

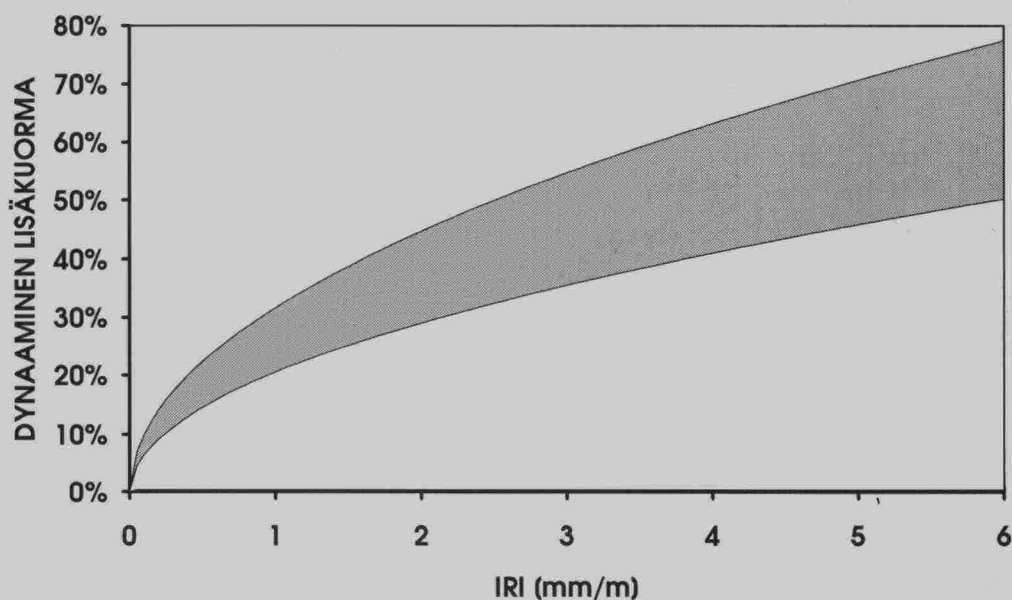


Tielaitos

Vesa Laitinen, Pekka Halonen

Teiden tasaisuusmittareiden vertailu

PTM:n, Roadmanin ja Dipstickin laitevertailu sekä epätasaisuuksien vaikutus tierasitukseen



Tielaitoksen
selvityksiä
40/1993

Helsinki 1993

Geokeskus
VTT/TGL

Tielaitoksen selvityksiä 40/1993

Vesa Laitinen, Pekka Halonen

Teiden tasaisuusmittareiden vertailu

PTM:n, Roadmanin ja Dipstickin laitevertailu sekä
epätasaisuuksien vaikutus tierasituksiin

**Tielaitos
Geokeskus**

Helsinki 1993

ISSN 0788-3722
ISBN 951-47-7674-7
TIEL 3200165
Painatuskeskus Oy
Helsinki 1993

Julkaisua myy:
Tielaitos, hallinnon palvelukeskus,
painotuotemyynti
Telefax (90) 1487 2652

Tielaitos
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puh. vaihde (90) 148 721

HALONEN, Pekka; LAITINEN, Vesa: Teiden tasaisuusmittareiden vertailu. PTM:n, Roadmanin ja Dipstickin laitevertailu sekä epätasaisuuksien vaikutus tierasituksiin.

Helsinki 1993, Tielaitos, Geopalvelukeskus, Tielaitoksen selvityksiä 40/1993, 76 s. + liitt. 24 s, ISBN 951-47-7674-7, ISSN 0788-3722, TIEL 3200165

Avainsanat päällysteiden kunnossapito, tasaisuus, IRI-arvo, dynaaminen akselipaino, tasaisuuden mittaaminen, tieprofiili

Tiivistelmä

Tutkimuksessa vertailtiin kahta maassamme käytössä olevaa nopeaa päällysteen tasaisuuden mittauslaitetta, Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen kehittämää palvelutasomittaria (PTM) sekä AL-Engineering Oy:n ja CCD-Fotoniikka Oy:n kehittämää Roadmania. Tutkimuksessa selvitettiin laitteiden keskinäistä vertailtavuutta sekä niiden mittausten toistettavuutta. Vertailussa oli lisäksi osalla mittauksista mukana VTT:n IRI-auto, jonka mittausmenetelmä perustuu samaan tekniikkaan kuin PTM-autossa käytetty.

Mittareita verrattiin niiden tuottaman IRI-tunnusluvun (International Roughness Index) perusteella. IRI-mittauksia tehtiin kaikkiaan 17 kohteessa (tieosalla), joiden yhteispituus oli 105 km. Samoilla koeosuuksilla tallennettiin myös kullakin 100 metrin osuudella auton korin maksimikihtyvyys ja sen paalulukema. PTM-auto ja IRI-auto tuottivat myös IRI4-arvon ja poikkeamaindeksin. Mittaukset PTM-autolla ja Roadmanilla tehtiin lokakuussa 1992 ja IRI-autolla helmikuussa 1993. Sääolosuhteiden vuoksi ei IRI-autolla voitu mitata kaikkia koeosuuksia, sillä tiet olivat jäisiä.

Tarkempia vertailuja tehtiin viidellä 500 metrin koeosuudella. Näillä koeosuuksilla tehtiin toistomittauksia sekä vaihdeltiin mittausnopeutta (40, 60, 80 km/h). Kultakin koeosuudelta tallennettiin myös pituusprofiili 32 cm:n välein kolmena toistomittauksena. Koeosuuksien keskimmäisen 100 metrin pituusprofiili mitattiin myös Dipstickillä. Muilla koeosuuksilla tehtiin mittauksia vain PTM-autolla ja Roadmanilla.

Molemmat testatut mittalaitteet näyttävät soveltuvan hyvin päällysteen pituussuuntaisen tasaisuuden mittaamiseen. Kummallakin laitteella IRI-mittausten toistettavuus on hyvä. VTT:n palvelutasomittarilla (PTM) toistomittausten hajonta oli hieman Roadmanin hajontaa pienempi. Roadmanilla mitatut IRI-arvot olivat PTM:llä mitattuja keskimäärin 12 % suurempia. Dipstickillä mitatuista profiileista määritettyihin IRI-arvoihin verrattuna PTM:n IRI-tulokset olivat keskimäärin noin 15 % alhaisempia. Alhaisilla IRI-arvoilla Roadmanin tulokset olivat Dipstickin tuloksia pienemmät, mutta korkeilla arvoilla (yli 4 mm/m) puolestaan suuremmat. VTT:n IRI-auto mittasi tasaisuutta samalla tasolla kuin PTM-auto.

IRI-tuloksia varten kehitettiin lineaariset matemaattiset mallit PTM-auton, Roadmanin ja Dipstickin välille. Näiden mallien avulla voidaan eri mittalaitteiden tulokset muuttaa yhteismitallisiksi. Koska vertailuaineisto mallien muodostamista varten oli verrattain suppea, eivät ne ole aivan tarkkoja.

Sekä PTM-autolla että Roadmanilla profiilimittausten toistettavuus oli erittäin hyvä. Verrattaessa näiden laitteiden ja Dipstickin profiileja keskenään, oli niiden välillä pieniä eroavaisuuksia. Dipstickin profiili oli kaikkein teräväpiirteisin ja Roadmanin profiili pehmein (vähiten aivan lyhytaaltoista epätasaisuutta). Mitään merkittäviä eroja profiilien aallonpituusjakautumien välillä ei ollut.

Erillisillä kiihtyvyyssmittauksilla pyrittiin selvittämään, minkälaisia pystykiihtyvyyksiä syntyy päällysteen epätasaisuuden aiheuttamana auton akseleille ja koriin. PTM:n ja Roadmanin osalla selvitettiin myös sitä, kuinka hyvin laitteet löytävät tieltä epätasaisuudesta aiheutuvat auton koriin kohdistuvat maksimikiihtyvyydet sekä niiden paikat eri ajokerroilla. Tutkimuksessa pyrittiin lisäksi selvittämään, kuinka erilainen auton akselistorakenne sekä anturin sijainti vaikuttavat saataviin tuloksiin. Tätä tarkoitusta varten oli tutkimuksessa mukana sekä takavetoinen (Volvo 244) että tyypillisellä jäykällä taka-akselilla varustettu etuvetoinen (Nissan Sunny farmari) henkilöauto.

Tutkimuksessa verrattiin lyhyesti kirjallisuuteen pohjautuen myös kiihtyvyyssmittaukseen perustuvaa Autolog-tasaisuudenmittauslaitetta.

Varsinkin epätasaisella tiellä akselin eri kohdilla pystykiihtyvyyden maksimiarvot poikkeavat huomattavastikin toisistaan. Etuvetoisen auton taka-akselin pystykiihtyvyyksien maksimit ovat takavetoisen auton arvoja korkeampia. Taka-akselin pystykiihtyvyydet ovat tasaisella tiellä keskellä akselia jopa 100 % suurempia kuin takavetoisella autolla. Asentamalla anturi lähelle pyörää ja suodattamalla auton rakenteista syntyvät taajuuskomponentit pois, voidaan taka-akselilta mitata tien epätasaisuutta.

Tien palvelutason määrittämiseen soveltuu profiilimittaukseen perustuva tasaisuudenmääritys paremmin kuin pelkkään kiihtyvyyden mittaamiseen perustuva. Auton rakenteella on vaikutusta kiihtyvyydestuloksiin, kun mittaukset tehdään auton akselilta.

Dynaamisen rasitusindeksin laskemista varten on tutkimuksessa mukana olevissa PTM-autossa ja Roadmanissa matemaattinen neljännesautomalli, joka laskee mitatusta tieprofiilista dynaamiset lisäkuormat. Dynaamisella lisäkuormalla tarkoitetaan hetkellisen dynaamisen ja staattisen akselipainon erotusta. Dynaaminen kuormitus aiheutuu tien epätasaisuudesta, ja siihen vaikuttaa myös auton jousitus. Neljännesautomalli on hyvin yksinkertaistettu malli todellisesta kuorma-autosta. Toisaalta yksinkertainen malli mahdollistaa reaaliaikaisen dynaamisten tierasitusten laskennan tien profiilimittausten yhteydessä. Yksityiskohtaista simulointia varten VTT:llä on käytettävissä ADAMS-ohjelmisto, johon on mallinnettu todellinen neliakselinen kuorma-auto.

Epätasaisella tiellä sekä PTM-auton että Roadmanin antamat lisärasitukset ovat samansuuntaisia kuin kuorma-auton akselilta mitattu dynaaminen lisäkuorma. Neljännesautomallin toiminta erilaisen aallonpituusjakauman omaavilla teillä vaatii edelleen tutkimista.

Mittausten yhteydessä tutkittiin alustavasti, kuinka hyvin tiehen asennettu ajoneuvovaaka WIM (Weight-In-Motion) pystyy mittaamaan dynaamisia akselipainoja. Tarkastelussa mukana olleella pienellä aineistolla nopeudella 80 km/h WIM:n antamat dynaamiset akselipainot olivat lähes yhteneviä instrumentoidulla kuorma-autolla mitattujen dynaamisten akselipainojen kanssa. Pienemmillä nopeuksilla WIM antaa selvästi liian pieniä lukemia (nopeudella 40 km/h noin -30 %).

Dynaamisten akselipainojen toistuvuuden selvittämiseksi tutkimuksessa tehtiin VTT:n kuorma-autolla dynaamisia akselipainomittauksia. Dynaaminen akselipaino toistuu lähes täydellisesti ajatettaessa samalla nopeudella samaa tieprofiilia. Nopeuteen 80 km/h verrattuna nopeuksilla 40 ja 60 km/h dynaaminen akselipaino ei toistunut täysin saman vaiheisesti, vaan akselit pyrkivät toimimaan ominaistajuutensa mukaisesti. Kuitenkin pienikin epätasaisuus pakotti akselit toimimaan samaan tahtiin.

Abstract

The Road Surface Monitoring Vehicle (RSM = PTM) developed by the Technical Research Centre of Finland measures both the longitudinal profile (evenness) and transverse profile (rutting) of the road. Macro and mega texture, dynamic truck index (DTI) and road geometry (curvature, gradient, and crossfall) can be measured by this vehicle. Distresses can be detected visually. The longitudinal profile of a road surface is measured at 40 mm intervals using a laser detector and an accelerometer. The International Roughness Index (IRI) can be calculated from this profile. The dynamic truck index describes the dynamic loading caused by a heavy vehicle tyre as a result of the road evenness.

The Roadman device to measure the road surface evenness has been developed in Finland by AL-Engineering Oy and CCD-Fotoniikka Oy. The longitudinal profile is determined using only an accelerometer. The dynamic truck index can also be calculated.

These two devices were compared to each other and profiles measured with them were compared to the profiles measured with Dipstick profile device. The IRI value was measured with RSM and Roadman from 17 different road sections, which length varied between 2.5 - 9 km (total length 105 km). The longitudinal profile was also measured with all three devices from five 100 m sections. IRI values measured with RSM-vehicle were about 15 % lower than values calculated from profiles measured with Dipstick. The IRI value was lower measured with Roadman than with Dipstick when IRI was less than 4 mm/m, and higher when IRI was more than 4 mm/m. Average difference was 23 % (Tables 7-9, pages 24-25). IRI values were about 12 % higher measured with Roadman than with RSM. However linear regression showed good correlation between IRI values from these devices (between RSM and Dipstick 0.99, Roadman and Dipstick 0.97, RSM and Roadman 0.99) and no significant differences on the measured profiles between the different devices could be noticed.

The repeatability of the measurements was very good with both devices RSM-vehicle and Roadman. The variation coefficient was about 5 % on RSM and 6 % on Roadman, when the measured road section was 500 m long and there were five different runs.

Acceleration measurements were also done on passenger cars axles. Vertical acceleration on the middle of the axle was not the average of accelerations

beside the wheels. It was often higher caused by the vibrations of the car. The accelerations were also affected by the type of the car, especially depending on if the car was front or back wheel drive.

For the dynamic truck index there is a special quarter car simulation model for trucks in RSM-vehicle and Roadman. The additional dynamic loads caused by unevenness of the road are calculated using this model. The additional dynamic load means the difference between static load and momentary dynamic load. The quarter car model simplifies the impact of a truck load. The amount of additional dynamic loads were about the same determined by RSM and Roadman when compared to the loads measured with an instrumented lorry. However the dynamic truck index requires still further research and developing.

Alkusanat

Tutkimuksessa vertailtiin Suomessa käytössä olevia nopeita tiepääällysteen tasaisuuden mittausrakenteita. Tutkimuksessa oli mukana kaksi eri periaatteella toimivaa mittaria, VTT:n kehittämä Palvelutasomittari sekä AL-Engineering Oy:n ja CCD-Fotoniikka Oy:n kehittämä Roadman. Näillä molemmilla mittalaitteilla pystytään tuottamaan kansainvälisesti kehitetty ja hyväksytty tasaisuuden tunnusluku IRI (International Roughness Index). Pyrittiin selvittämään, millaisia eroja näiden laitteiden välillä on.

Tutkimuksen on tilannut tielaitos ja yhdyshenkilönä sekä työtä ohjanneen työryhmän puheenjohtajana on toiminut ylitarkastaja Reijo Orama. Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratoriossa tutkimuksesta on vastannut työryhmä, johon ovat kuuluneet johtava tutkija Matti Huhtala, tutkija Vesa Laitinen ja tutkimusinsinööri Pekka Halonen. Tutkimusta on ohjannut työryhmä, johon edellisten lisäksi on kuulunut tielaitoksesta kauppat.maist. Kari Hiltunen, dipl.ins. Ismo Iso-Heiniemi, dipl.ins. Pertti Virtala ja dipl.ins. Olli Nordenswan, tekn. tri Eero Lehtipuu, Ins. tsto Eero Lehtipuu ja dipl.ins. Anssi Lampinen, AL-Engineering Oy sekä VTT/TGL:stä dipl.ins. Jari Pihlajamäki. Tutkimusraportin ovat laatineet Vesa Laitinen ja Pekka Halonen. VTT:n PTM- ja IRI-auton osalta kenttämittaukset ovat tehneet tutkimusavustajat Kimmo Lyra, Tapio Jousinen ja Onni Kosonen sekä Roadmanin mittausten osalta laitteen kehittäjä Anssi Lampinen. Kuorma-autolla tehdyistä rasitusmittauksista sekä erillisistä kiihtyvyyksmittauksista on vastannut Pekka Halonen.

Sisältö

1	JOHDANTO	11
2	IRI-MITTAUSMENETELMÄ JA TUTKIMUKSESSA MUKANA OLLEIDEN LAITTEIDEN TOIMINTAPERIAATTEET	13
2.1	IRI-mittausmenetelmän periaate	13
2.2	PTM-auton toimintaperiaate	15
2.3	Roadman-laitteen toimintaperiaate	18
2.4	Dipstickin toimintaperiaate	20
2.5	Autolog-laitteen toiminta	22
3	PERUSKOEOSUUKSIEN TASAISUUSMITTAUSTEN TULOKSET	24
4	TARKKOJEN KOEOSUUKSIEN TASAISUUS MITTAUKSET	30
5	TARKKOJEN KOEOSUUKSIEN PROFIILIMITTAUKSET	41
6	ERILLISET KIIHTYVYYSMITTAUKSET	43
7	DYNAAMINEN RASITUSINDEKSI JA SEN TULOKSET	51
8	DYNAAMISET AKSELIPAINOT	56
9	MUITA TUTKIMUKSIA	65
9.1	Tielaitoksen PTM-autojen vertailumittaukset	65
9.2	Tanskalainen tasaisuusmittareiden vertailu	67
9.3	Tasaisuusmittareiden vertailu SHRP:ssa	68
9.4	Saksalainen tasaisuusmittareiden vertailu	68
10	JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSIA	69
11	KIRJALLISUUSLUETTELO	72
12	LIITELUETTELO	75

1 JOHDANTO

Päällysteen tasaisuutta mitataan tien kunnon inventoimiseksi tai urakoitsijan päällystystyön laadun tarkistamiseksi sekä jossain määrin työaikaista laadunohjausta varten tutkimuskäyttöön. Perinteisesti päällysteen tasaisuutta on tarkasteltu oikolaudan ja oikolautamittarin (ns. juorun) avulla. Tämän lisäksi käytössä on ollut yhteenlaskeva sysäysmittari eli nk. Pomppu (Bump Integrator). Suomessa seuraavana kehitysvaiheena 1980-luvun alkupuolella oli laser-tasaisuusmittari, jolla laserin ja kiihtyvyysanturin avulla määritetään tien pituusprofiili. Tästä pituusprofiilista lasketaan epätasaisuusluku, joka perustuu samaan periaatteeseen kuin "pomppuluku", eli lasketaan summautuva epätasaisuusluku (cm/km), kun profiilia pitkin ajaa vakioitu Bump Integrator -ajoneuvo nopeudella 32 km/h. 1990-luvun alussa pomppuluku korvattiin rutiinimittauksissa uudella Maailmanpankin vuonna 1982 kehittämällä tasaisuuden tunnusluvulla IRI (International Roughness Index).

VTT alkoi 1980-luvun puolivälissä kehittää uutta tienpäällysteen kunnon mittauslaitetta, palvelutasomittaria. Laite mittaa muun muassa tien pituusprofiilin, josta voidaan laskea erilaisia tien pituussuuntaisen tasaisuuden tunnuslukuja, esimerkiksi IRI-arvo ja auton koriin kohdistuvia kiihtyvyyksiä.

VTT rakensi itselleen ensimmäisen PTM-auton vuonna 1987. Vuonna 1990 tielaitos hankki omaan käyttöönsä autoja kolme kappaletta ja seuraavana vuonna vielä yhden lisää. Vuonna 1992 PTM-autoja oli siis käytössä yhteensä viisi: yksi VTT:llä, Uudenmaan ja Turun tiepiireillä yhteisessä käytössä yksi, sekä autot Hämeen tiepiirillä yhdessä Vaasan tiepiirin kanssa, tiehallituksella Kainuun ja Lapin tiepiirien kanssa ja Keski-Pohjanmaan tiepiirillä Oulun kanssa. VTT:llä on lisäksi yksi IRI-auto, jolla voidaan mitata pituussuuntaista mutta ei poikkisuuntaista epätasaisuutta. Vanhojen päällysteiden kunnon mittaamiseen PTM-autoja on käytetty vuodesta 1988 lähtien ja uusien päällysteiden laaduntarkastusmittauksiin vuodesta 1991 alkaen.

1990-luvun alkupuolella on Suomen markkinoille alkanut tulla muitakin tasaisuuden mittaamiseen tarkoitettuja nopeita mittalaitteita. Tästä syystä on katsottu tarpeelliseksi selvittää näiden laitteiden keskinäinen vertailtavuus.

Tämän tutkimuksen yhteydessä vertailtiin keskenään maassamme käytössä olevaa kahta eri periaatteella toimivaa mittauslaitetta: VTT:n kehittämiä palvelutasomittaria (PTM-auto) ja IRI-autoa sekä AL-Engineering Oy:n ja CCD-Fotoniikka Oy:n kehittämää Roadmania. Tarkoituksena oli selvittää laitteiden keskinäistä vertailtavuutta ja mittausten toistettavuutta. Lisäksi tehtiin erillisiä kiihtyvyysmittauksia auton akselilta, koska tämäntyyppiseen mittaamenetelmään perustuva mittauslaite on myös olemassa markkinoilla (Autolog).

Palvelutasomittariin on kehitteillä uusi tunnusluku, dynaaminen rasitusindeksi. Indeksillä kuvaa sitä lisärasitusta, joka kohdistuu tielläliikkuja tierakenteeseen epätasaisuuden vaikutuksesta lähinnä raskaiden ajoneuvojen osalta. Tässä tutkimuksessa selviteltiin hieman dynaamisia kuormituksia ja testattiin alustavasti rasitusindeksiä.

2 IRI-MITTAUSMENETELMÄ JA TUTKIMUKSESSA MUKANA OLLEIDEN LAITTEIDEN TOIMINTAPERIAATTEET

2.1 IRI-mittausmenetelmän periaate

Pituussuuntaisen tasaisuuden tunnusluku IRI (International Roughness Index) on Maailmanpankin määrittelemä kansainvälinen tunnusluku vuodelta 1982. Sen laskenta perustuu jollain käytettävissä olevalla keinolla tuotettuun tien pituusprofiiliin. Pituusprofiiliin sijoitetaan laskennallisesti kulkemaan vakionopeudella (80 km/h) etenevä määrätyillä rengas-, jousi- ja iskunvaimennusominaisuuksilla varustettu neljännesauto (Reference Quarter Car Simulator, RQCS). Tämän standardiajoneuvoneljänneksen korin ja pyörän välisistä pystysuuntaisista liikkeistä lasketaan jousitetun ja jousittamattoman massan välinen liike. IRI-arvo on pystysuuntainen liike pituusyksikköä kohti ja sen yksikkö on mm/m tai m/km. Pituusprofiilin mittaustavalle ei ole asetettu vaatimuksia, ainoastaan mittaustarkkuudelle ja profiilin mittauspisteiden väliselle etäisyydelle. Profiilin referenssimittaustavoiksi on Maailmanpankki määrittänyt vaituksen ja Dipstick-mittauksen /3/.

Neljännesajoneuvon ominaisuudet ja taajuusvastekäyrä on esitetty kuvassa 1. Kyseisillä ominaisuuksilla varustettu ajoneuvo reagoi käyrän osoittamilla painokertoimilla tieprofiilissa esiintyviin eri taajuuksiin. Huippuarvot 1,5 ja 10 Hz vastaavat auton rungon ja pyörän ominaisvärähtelytaajuuksia. Laskennassa käytettävällä ajonopeudella 80 km/h taajuuksien huippuarvot vastaavat aallonpituuksia 15 ja 2,2 m. IRI-luku kuvaa epätasaisuutta, jonka aallonpituusalue on noin 0,3 - 30 m. Tämä aallonpituusalue on sellainen, että tielläliikkuja tuntee sen epämukavimpana.

IRI4-arvo määritetään muuten kuten IRI-arvokin, mutta siitä on suodatettu pois arvoa 5,5 Hz:ä pienemmät taajuudet. Tästä syystä aallonpituudeltaan 4 metriä pitemmät epätasaisuudet eivät vaikuta IRI4-arvon suuruuteen (kuva 1). IRI4 on laadittu kuvaamaan urakoitsijan levitystyön laatua.

Poikkeamaindeksi määritetään asettamalla mitattuun pituusprofiiliin laskennallisesti 5,12 m pitkä leikkaava oikolauta, jota siirretään 32 cm:n välein eteenpäin. Koska oikolauta on profiilia leikkaava, ei päällysteen pinnalta tehdyillä perinteisillä oikolautamittauksilla saada yleensä samoja poikkeamatarvoja. Jokaisesta laudan asemasta määritetään minimi- ja maksimipoikkeamat. Jokaisella 100 m:n osuudella kertyneet 2 mm suuremmat poikkeamahavainnot luokitellaan 1 mm:n luokkaväleihin ja eri poikkeamaluokkiin kertyneiden havaintojen yhteislukumäärät kerrotaan luokkakohtaisilla painokertoimilla. Näin saadut painotetut luokkaluvut lasketaan yhteen ja tulos on

kyseisen 100 m:n jakson poikkeamaindeksi (PI). Poikkeamaindeksi on sitä suurempi, mitä enemmän oikolautatasosta esiintyy suuria poikkeamia. Leikkaavan oikolaudan toimintaperiaate on esitetty kuvassa 2. IRI4 ja poikkeamaindeksi on kehitetty Suomessa.

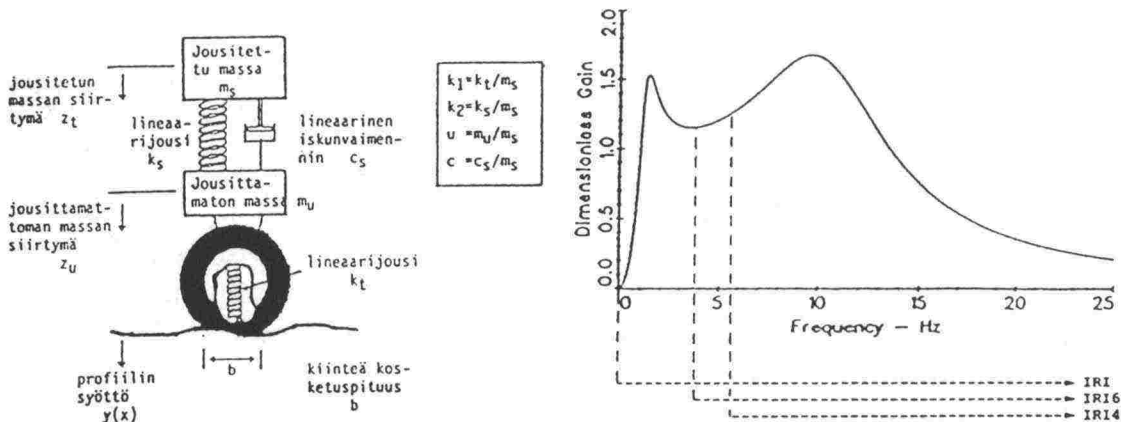
Poikkeamaindeksin laskukaava:

$$PI = (1/45) * l_{km23} + (2/45) * l_{km34} + (3/45) * l_{km45} + (4/45) * l_{km56} + (5/45) * l_{km67} + (6/45) * l_{km78} + (7/45) * l_{km89} + (8/45) * l_{km910} + (9/45) * l_{kmy10}.$$

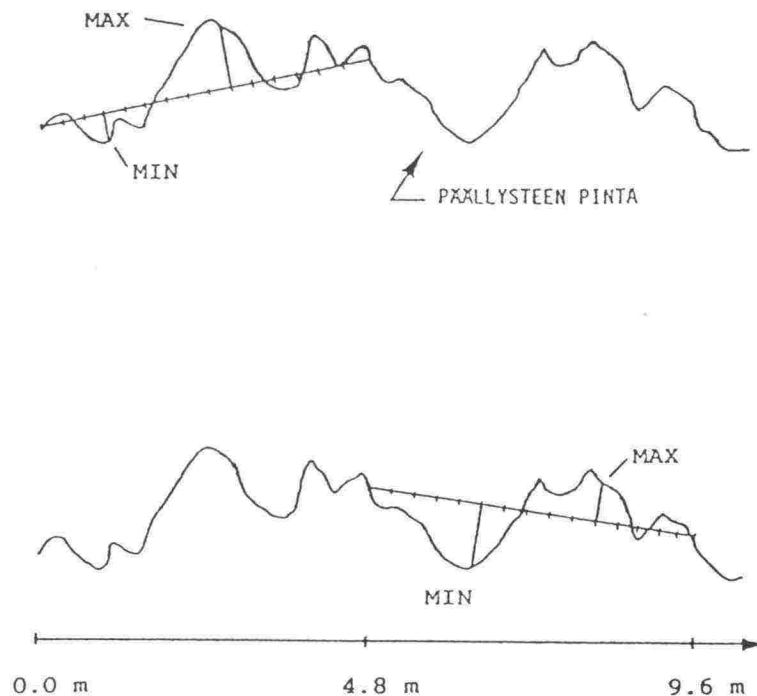
Kaavassa esiintyvät poikkeamaluokat:

l_{km23} = välin 2 - 3 mm havaintojen lukumäärä, l_{km34} = välin 3 - 4 mm havaintojen lukumäärä ...

l_{kmy10} = yli 10 mm havaintojen lukumäärä.



Kuva 1. IRI-menetelmän neljännesajoneuvon laskennallinen malli ja käytetyn malliauton taajuusvastekäyrä.



Kuva 2. Leikkaavan oikolaudan toimintaperiaate pituusprofiilissa (poikkeamaindeksin määrittäminen). Jokaisesta oikolaudan asemasta (siirros 32 cm:n välein) määritetään minimi- ja maksimipoikkeama 4 cm:n välein. Poikkeamaindeksin määrittämiseen käytetään maksimipoikkeamaa.

2.2 PTM-auton toimintaperiaate

IRI-mittauksia tehdään VTT:n tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorion ja instrumenttitekniikan laboratorion kehittämällä PTM-mittausautolla, jolla voidaan mitata teiden urasyvyyttä ja tasaisuutta. VTT:llä on myös ns. IRI-auto, jolla voidaan mitata vain teiden tasaisuutta. Kaikki autot on rakennettu siten, että ne mittaavat teknisesti samalla tavalla samoja muuttujia ja ovat keskenään vertailukelpoisia.

Tasaisuustiedon keruu päällysteen pinnasta tapahtuu palvelutasomittariin (PTM-auto) asennetun laserkameran ja kiihtyvyyssanturin avulla. Laser- ja kiihtyvyyssanturi on asennettu auton koriin oikean etupyörän eteen. Laserilla mitataan tien pinnan ja korin välistä etäisyyttä ja kiihtyvyyssanturilla korin pystysuuntaista liikettä. Mittaustiheys on 40 mm ja mittaukset tehdään samanaikaisesti sekä laserilla että kiihtyvyyssanturilla. Mittaustiedoista lasketaan tien pituussuuntainen profiili 32 cm:n välein. Määritetystä profiilista lasketaan IRI-, IRI4-arvo ja poikkeamaindeksi edellisessä luvussa esitetyllä tavalla. Uramittauksessa käytetään lisäksi leveydeltään säädettävissä olevaa

uramittauspalkkia, jossa on 15 ultraäänianturia. Normaalisti uramittausten mittausväli on 2 m ja tietojen tallennusväli 10 m. PTM-autossa käytetään lisäksi visuaaliseen havainnointiin perustuvaa manuaalista vaurionkartoitustäppäimistöä. IRI-autossa ei ole uramittauspalkkia, joten sillä ei voi mitata urasyvyyskä.

Mittaussnopeus voi vaihdella välillä 30 - 90 km/h, mutta tulokset ovat periaatteessa nopeudesta riippumattomia. Jokainen mittaus sidotaan tierekisterin osoitejärjestelmään. Tieltä lasketaan IRI-, IRI4- ja PI-arvot 100 metrin jaksoissa. Tässä tutkimuksessa käsitellään pääosin IRI-arvojen 100 metrin arvoja. Tuloksista on laskettavissa tunnuslukujen keskiarvot koko tieosalle. Mittaustulosten käsittely tapahtuu reaaliaikaisesti.

Mahdollisista ulkopuolisista tekijöistä aiheutuvat virheelliset tulokset hylätään ja mittaukset uusitaan, mikäli hylätyllä tuloksella on merkitystä kokonaisuu-teen. Sateella tienpinnan lätköityessä ei mitata. Mittaustulokset on saatavissa välittömästi mittauksen päätyttyä sekä paperilla että tietokonelevykkeillä.

Mittaukset tuottavat seuraavat tulokset (LAATU-ohjelma, käytetään pääasiassa uusien päällysteiden laadunarvostelussa):

- pituussuuntainen tasaisuus IRI (mm/m)
- suodatettu pituussuuntainen tasaisuus IRI4 (mm/m)
- pituusprofiilin poikkeamaindeksi PI (mm)
- maksimi- ja minimipoikkeamat paalulukuiheen (mm)
- laskennalliseen IRI-ajoneuvoon kohdistuva maksimikihtiävyys 100 m:n matkalla (m/s^2) ja sen paalulukuihe (m)
- 10 mm:ä suuremmat poikkeamat (mm) paalulukuiheen (m)
- raja-arvojen (IRI4 ja PI) ylityksistä määräytyvät arvonalennusprosentit
- mittausnopeus (km/h)
- mitattu matka (m).

Palvelutasomittarilla voidaan mitata myös muita tien ja päällysteen ominai- suuksia kuvaavia tunnuslukuja. Pituusprofiilista lasketaan dynaaminen rasitusindeksi (DRI), joka kuvaa raskaan liikenteen tielle aiheuttamia rasituksia. Laskennallisesti DRI kuvaa renkaan ja tienpinnan välistä voimaa. Käytössä on vastaavanlainen malli kuin IRI-laskennassa, mutta mallin kertoimet vastaavat kuorma-autoa. Kun IRI-arvo kuvaa tien epätasaisuuden vaikutusta tiellä liikkujan ajomukavuuteen, kuvaa rasitusindeksi ajoneuvon aiheuttamia rasituksia tien rakenteeseen. Jos tien kantavuus oletetaan kaikkialla samaksi, on oletettavaa, että ensimmäiseksi vaurioituvat ne kohdat tiestä, joilla dynaaminen rasitusindeksi on suurin. Dynaaminen rasitusindeksi

lasketaan aina 100 metriä kohti, ja siitä tallennetaan keskiarvo, maksimi ja minimi.

Lasermittarin avulla pystytään määrittämään päällysteen karkeus luokiteltuna makrokarkeuteen ($\lambda = 10 - 50$ mm) ja megakarkeuteen ($\lambda = 50 - 500$ mm). Karkeus vaikuttaa mm. kitkaan, polttoaineenkulutukseen, vierintävastukseen, meluun, valonheijastukseen ja kuivatukseen. Makrokarkeuden mittaamisesta pyritään kehittämään menetelmä myös päällysteen lajittuneisuuden mittaamiseen.

Tien geometriamittaus sisältää sivu- ja pituuskaltevuuden ja kaarresäteen mittauksen gyroskooppien (2 kpl) ja kaltevuusanturien (2 kpl) avulla. Kaltevuusanturit mittaavat auton kallistumaa sekä pituus- että poikkiakselin ympäri. Gyroskoopit mittavat kulmanopeutta kahden akselin ympäri. Toisen gyroskoopin lukema antaa auton kulkeman kaarresäteen, ja auton kallistumasta voidaan määrittää tienpinnan kallistuma sekä pituus- että poikkisuunnassa. Mittaustuloksia voidaan käyttää mm. turvallisuustarkasteluihin ja päällysteen tasauksen suunnitteluun. Sivukaltevuuden mittausjärjestelmä on vielä osittain muutoksen alainen ja sen tarkkuutta pyritään kehittämään.

Visuaalisesti havaitut vauriot kerätään autossa olevan erillisen näppäimistön avulla. Samanaikaisesti on mahdollista tallentaa 12 vauriotyyppiä. Mahdollisia tallennettavia vaurioita ovat mm. poikki-, pituus- ja verkkohalkeamat sekä reiät ja erityyppiset paikkaukset.



Kuva 3. VTT:n palvelutasomittari (PTM-auto). Edessä poikkiprofiilia mittaava palkki ultraääniantureineen.

2.3 Roadman-laitteen toimintaperiaate

AL-Engineering Oy:n ja CCD-Fotoniikka Oy:n kehittämä Roadman perustuu tienpinnan pituusprofiilin mittaamiseen ajoneuvon akseliin (yleensä jäykkään taka-akseliin) lähelle mittaavaa pyörää (yleensä oikea pyörä) kiinnitetyllä kiihtyvyyssanturilla ja tarkkaan matkamittaukseen ajoneuvon matkamittauksesta saatavalla mittauspulssilla ja haluttujen inventointitietojen keräämiseen täydellisellä alfanumeerisella näppäimistöllä (kuva 4).

Kiihtyvyyssanturilla mitatusta pituusprofiilista lasketaan IRI-mallin avulla IRI-arvo, kuten PTM-autollakin. Pituusprofiilin laskennassa käytetään kolmasosametrin välein mitattuja arvoja. Matkamittauksen pulssien määrään vaikuttaa ajoneuvon matkamittarin rakenne; vaijerivälitteisellä laitteella mittauspulssia on 3-4 kpl/vaijerin kierros, mikä käytännössä tarkoittaa noin 1800 - 2400 pulssia/km. Uusissa ajoneuvoissa on yleistynyt sähköinen matkamittarirakenne, josta saatavien pulssien määrä vaihtelee autoittain.



Kuva 4. Roadman-mittauslaitteen autossa oleva keskusyksikkö.

Roadman voidaan asentaa mihin tahansa ajoneuvoon. Ainoa ehto on, että anturin on seurattava mahdollisimman hyvin mittauspyörän pystysuoraa liikettä (ja kiihtyvyyttä), ts. käytännössä se kiinnitetään jäykkään taka-akseliin tai pyörän jousitukseen. Laite koostuu kiihtyvyyssanturista, pulssianturista tai -liitännästä, virtalähteestä (tupakansytytin 12 V) ja keskusyksiköstä, joka sisältää laitteen elektronikan. Keskusyksikössä on näppäimistö, prosessorit ohjelmineen ja muisti mitatun ja kerätyn tiedon tallentamista varten. Mittaustulosten käsittely tapahtuu reaaliaikaisesti. Muistikapasiteetti IRI-mittauksissa on noin 300 km ja profiilimittauksissa noin 18 km. Mittaustulokset voidaan purkaa ajoneuvossa tai toimistossa printterille tai PC:hen tulosten jatkokäsittelyä varten.

Mittausnopeus liikenteessä on vapaasti valittavissa noin 120 km/h:iin saakka. IRI-arvon laskennassa laite käyttää aina edellisen 100 m:n mukaista keskinopeutta.

Roadman tuottaa seuraavanlaisia tunnuslukuja:

- pituussuuntainen epätasaisuus IRI (mm/m)
- tien pituusprofiili (pystysuuntaiset siirtymät) noin 40 m:n aallonpituuteen asti
- pienten heittojen lukumäärä (kpl/100 m), korin kiihtyvyyssraja vapaasti asetettavissa
- pienten painumien lukumäärä (kpl/100 m)
- suurten heittojen lukumäärä (kpl/100 m)
- suurten painumien lukumäärä (kpl/100 m)
- suurin korikihtyvyyssarvo kullakin 100 m:n osuudella (m/s^2) ja sen paikka (m)
- pystysiirtymän pystynopeusprofiili, josta lasketaan siirtymäprofiili
- dynaaminen raskaus GM-mallin avulla (maksimiarvo 1 /s eli n. 10-20 m matkalla)
- mittausnopeus kullekin 100 metrille
- säännöllinen kouruuntuminen sorateilla kiihtyvyyssmittauksen perusteella
- vaurio-, kunto-, yms. vapaa inventointi näppäimistön avulla.

Painumat ja heitot määritetään IRI-mallilla laskettujen korikihtyvyyksien avulla. Edellä esitetyt tunnusluvut tulostetaan joko paperille tai PC:hen yleensä 100 metrin tuloksena tai eräissä tapauksissa tarkkoina metriarvoina.

2.4 Dipstickin toimintaperiaate

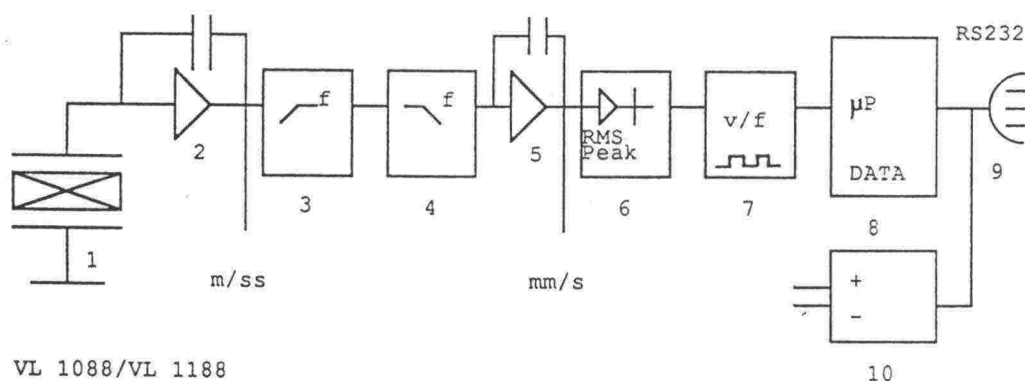
Dipstick Road Profiler on tien profiilin mittaamista varten kehitetty laite. Sillä pystytään mittaamaan profiili 30 cm:n välein. Laitteen toimintaperiaate perustuu siihen, että laitetta käännettäessä kahden jalkansa varassa pitkin mitattavaa profiilia ja kussakin asemassa laite määrittää kaltevuusasemansa. Kun jalkojen välinen etäisyys on 30 cm, voidaan ko. matkan aikana oleva korkeuden muutos laskea. Tämän jälkeen näiden 30 cm:n matkalla tapahtuneiden muutosten perusteella voidaan laskea koko haluttu pituusprofiili. Profiilista voidaan laskea IRI-arvo laitteen valmistajan toimittaman ohjelman avulla. Laite on esitetty kuvassa 5 /1/.



Kuva 5. Pituusprofiilin mittaus Dipstick-laitteella.

2.5 Autolog-laitteen toiminta

Autolog-mittauslaitteisto on kiihtyvyyden ja heilahdusnopeuden mittaamiseen käytettävä laitteisto. Se koostuu vibrologgerista ja mikrosta. Vibrologgerin periaatteellinen rakenne on esitetty kuvassa 6 /2/.



1. Pietsosähköinen kiihtyvyyssanturi (50 mV/g, 25 kHz)
2. Varausvahvistin. Lähtö kiihtyvyydelle m/s^2
3. Alarajasuodatin
4. Ylärajasuodatin
5. Nopeusintegraattori. Lähtö värinänopeudelle mm/s
6. Mean/peak-arvojen ilmaisim
7. Jännite/taajuusmuunnin
8. Mikrokontrolleri, ohjelma ja datamuisti
9. RS-lähtöliitin
10. Ladattavat akut 2x9 V

Kuva 6. Vibrologgerin rakenne /2/.

Vibrologger on Erkki Matilaisen kuvauksen mukaan asennettu etuvetoisen Mitsubishi Lancer henkilöauton taka-akselin keskelle, akselin päälle. Asennustapa antaa molempien pyörien kulku-urien epätasaisuuksien yhteisen kiihtyvyyden (ns. puoliatotekniikka). Mittauksessa käytettävät slow- ja fast-ajat t_s ja t_f voidaan valita (valittu minimi 0,1 s), samoin slow-aikaan sisältyvä

jaksojen määrä (käytetty 10, jolloin $t_s = 1$ s). Mittauksen aloitus, lopetus ja keskeytys ohjataan käskyillä /2/.

Mittaustietoina tallentuu mm. slow-ajan t_s tehollinen keskiarvokiihtyvyys, ns. mean-kiihtyvyys a_m (RMS = Root Mean Square), suurin fast-jaksona t_f todettu arvo, ns. peak-kiihtyvyys a_p , mittauksen aloitus-, keskeytys- ja lopetusajankohdat sekä jokaisen arvoparin a_p ja a_m sijainti tulosjoukossa. Mittauksen jälkeen tiedot taltioidaan tietokonelevykkeelle. Ohjaus tapahtuu auton ohjaamossa olevalla mikrolla /2/.

3 PERUSKOEOSUUKSIEN TASAISUUSMITTAUSTEN TULOKSET

Laitteiden tasaisuusmittausten välistä vertailua varten valittiin tasaisuudeltaan erityyppisiä teitä, joilta mitattiin Roadmanilla IRI-arvot ja kiihtyvyyshuiput sekä PTM- ja IRI-autolla edellisten lisäksi IRI4-arvot ja poikkeamaindeksit. Koekohteita oli yhteensä 17 kappaletta. Kukin koeosuus oli yhden kokonaisen tieosan pituinen (2760 - 8665 m). Koeosuudet mitattiin kummallakin mittalaitteella toinen kaista yhteen suuntaan yhden kerran. Osalla koeosuuksista tehtiin mittaukset myös VTT:n IRI-autolla. Kaikilla koeosuuksilla ei pystytty tekemään mittauksia IRI-autolla sääolosuhteiden vuoksi (tiet jäässä tai lumisia). PTM- ja Roadman-mittaukset tehtiin lokakuussa 1992 ja IRI-auton mittaukset helmikuussa 1993.

Taulukossa 1 on esitetty tiedot koeosuuksista ja taulukossa 2 PTM:n ja Roadmanin IRI-tulokset sekä tulosten väliset erot. Taulukossa 2 koeosuudet on lajiteltu PTM-mittaustulosten perusteella IRI-arvon mukaan paremmuusjärjestykseen. Taulukossa 3 on esitetty PTM-auton ja IRI-auton mittaustulokset koeosuuksittain eri tunnuslukujen osalta. Kuvassa 7 on esitetty PTM-auton, IRI-auton ja Roadmanin IRI-tulokset sekä tulosten väliset erot absoluuttisina kuvassa 8 ja suhteellisina kuvassa 9. Taulukossa 3 on esitetty PTM:n ja IRI-auton tulokset myös muiden tunnuslukujen osalta (IRI, IRI4 ja PI).

Roadmanin mittaustulokset ovat lähes poikkeuksetta hieman suurempia kuin PTM-auton, keskimäärin 0,29 mm/m (noin 12 %). Vain yhdellä koeosuudella Roadmanin tulos oli PTM:n tulosta alhaisempi. Selvää yhteyttä eron ja IRI-arvon suuruuden välillä ei ole havaittavissa. Ero ei kasva IRI-arvon kasvaessa. Ennemmin näyttäisi siltä, että ero on koko ajan vakio tai se on riippuvainen mahdollisesti tien epätasaisuuksien taajuusjakaumasta; laitteet korostavat eri tavalla eri aallonpituista epätasaisuutta. Selitysaste laitteiden välillä oli kuitenkin korkea, koeosuuksien keskiarvoilla $r^2 = 0,965$. Selitysaste kaikista 100 metrin osuuksista laskettuna oli $r^2 = 0,651$. On luonnollista, että korrelaatio on alhaisempi tarkasteltaessa erillisiä sadan metrin tuloksia. Tällöin tuloksiin aiheutuu eroa mittauksen aloituskohdasta, jolloin kukin sadan metrin mittausosuus osuu hiukan eri paikkaan; kuitenkin ero on aina alle 10 m. Laskettaessa korrelaatio koko tieosan keskiarvosta tällainen ero mittauksessa tasoittuu.

PTM-auton ja IRI-auton tulosten väliset erot olivat erittäin pieniä. IRI-arvot erosivat toisistaan koeosuuksien keskiarvoissa 0,10 mm/m (5 %) ja IRI4-arvot 0,05 mm/m (4 %). Selitysasteet laskettuna koekohteiden keskiarvoista sekä yksittäisistä 100 metrin arvoista on esitetty taulukossa 4. Poikkeamaindeksin

osalla selitysaste on selvästi huonoin. IRI:n ja IRI4:n osalla selitysaste oli korkea. Myös IRI-auton ja Roadmanin välinen selitysaste oli korkea. Tieosien IRI-arvojen keskiarvojen selitysaste oli $r^2 = 0,935$ ja 100 metrin osuuksina tarkasteltuna $r^2 = 0,518$. Koska IRI-auton mittaukset tehtiin noin neljä kuukautta myöhemmin (lokakuu/helmikuu) kuin PTM- ja Roadmanmittaukset, on teiden tasaisuudessa saattanut tapahtua muutoksia. Tämä selittää ainakin osittain sitä, että korrelaatio ei ole aivan yhtä korkea kuin PTM:n ja Roadmanin välillä.

Taulukko 1. Peruskoeosuuksien tiedot.

Tie	Tieosa	Suunta	Pituus (m)	Mittausnopeus (km/h)
7	7	1	6330	80
51	8	1	5910	80
51	9	1	4385	80
53	32	1	5480	80
53	33	1	7760	80
53	34	1	5600	80
55	1	1	8115	80
55	4	1	7180	80
104	9	1	4930	60
122	6	2	8240	60
136	2	1	8665	60
143	5	1	3700	80
170	10	1	4570	80
1271	1	1	6100	60
1322	2	1	3485	60
1431	1	1	2760	60
1431	2	1	6015	60

Taulukko 2. Peruskoeosuuksien IRI-tulokset osuuksien keskiarvoina PTM-auton ja Roadman osalta.

Tie	PTM (mm/m)	Roadman (mm/m)	Ero: PTM - Roadman (mm/m)	Ero: PTM - Roadman (%)
53	1,41	1,67	0,26	18,4
53	1,48	1,67	0,19	12,8
55	1,54	2,00	0,46	29,9
53	1,59	1,92	0,33	20,8
7	1,71	1,94	0,23	13,5
55	1,87	2,20	0,33	17,6
51	1,92	2,05	0,13	6,8
51	2,06	2,40	0,34	16,5
122	2,10	2,02	-0,08	-3,8
170	2,29	2,55	0,26	11,4
1271	2,75	2,88	0,13	4,7
104	3,25	3,89	0,64	19,7
136	3,31	3,44	0,13	3,9
143	3,59	4,39	0,80	22,3
1322	3,79	4,18	0,39	10,3
1431	4,07	4,39	0,32	7,9
1431	4,21	4,35	0,14	3,3

Taulukko 3. Peruskoeosuuksien tasaisuustulokset, PTM-auto ja IRI-auto.

Tie	Tieosa	PTM-auto			IRI-auto		
		IRI (mm/m)	IRI4 (mm/m)	PI (mm)	IRI (mm/m)	IRI4 (mm/m)	PI (mm)
7	7	1,71	1,06	1,0	1,77	1,13	1,2
51	8	2,06	1,16	2,7	2,14	1,12	1,4
53	32	1,48	0,86	1,3	1,52	0,90	1,0
53	33	1,41	0,79	0,3	1,50	0,81	1,0
53	34	1,59	0,79	0,3	1,70	0,82	1,1
55	1	1,54	0,72	0,2	1,84	0,89	1,2
136	2	3,31	1,57	8,3	3,54	1,67	2,6
170	10	2,29	0,97	2,6	2,21	0,97	1,5
1271	1	2,75	1,67	7,5	2,58	1,53	8,6

Taulukko 4. PTM-auton ja IRI-auton mittaustulosten väliset selityssasteet. Keskiarvo tarkoittaa eri koeosuuksien keskiarvotuloksista laskettua selityssastetta ja toisena tarkastellaan erillisten sadan metrin arvojen välistä selityssastetta.

Tunnusluku	r^2 (keskiarvot)	r^2 (100 metrin osuudet)
IRI	0,968	0,554
IRI4	0,957	0,578
Poikkeamaindeksi	0,535	0,326

Esitettyjen tulosten perusteella voidaan laskea lineaarinen regressio eri laitteiden välille ja siten saada niiden IRI-mittaustulosten välille yksinkertaiset matemaattiset mallit. Regressiot on laskettu peruskoeosuuksien keskiarvotuloksista. Perustasoksi on valittu PTM-auton mittaustulokset. Muiden mittauslaitteiden tuloksien muuttamiseksi PTM-tulosten tasolle on esitetty regressiosuorien yhtälöt. PTM-auton tulostasoa käytetään perustasona, koska tällä hetkellä maassa on käytössä viisi PTM-autoa ja suuri osa olemassa olevasta mittausdatasta perustuu PTM-auton mittauksiin. Ensimmäisessä kaavassa on esitetty muutos, kuinka Roadman-tulokset saadaan vastaamaan PTM-tuloksia, toinen kaava muuttaa Roadmanin tulokset IRI-autoa vastaaviksi

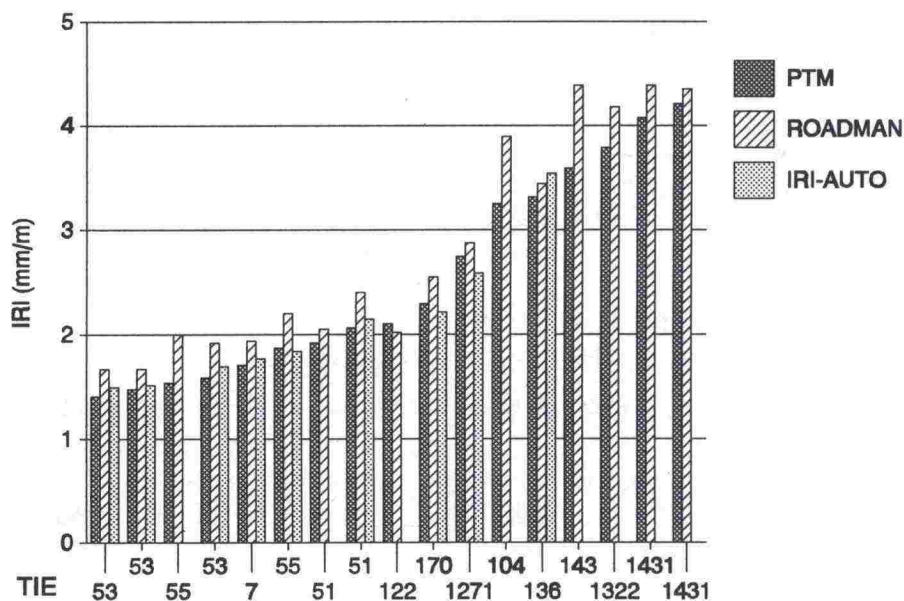
ja kolmas IRI-auton tulokset PTM-autoa vastaaviksi. Liitteissä 1.1 - 1.2 on esitetty regressiot kuvien muodossa pistejoukkoineen.

PTM-auto = $0,963 \cdot \text{Roadman} - 0,063$, estimaatin standardivirhe SEE = 0,19

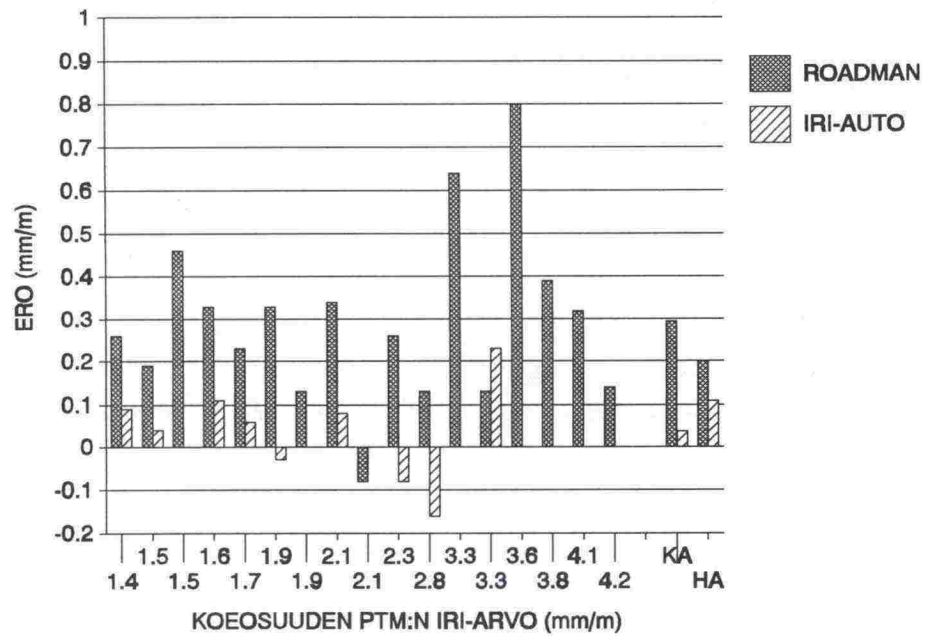
IRI-auto = $1,053 \cdot \text{Roadman} - 0,289$, estimaatin standardivirhe SEE = 0,12

PTM = $0,966 \cdot \text{IRI-auto} + 0,035$, estimaatin standardivirhe SEE = 0,18.

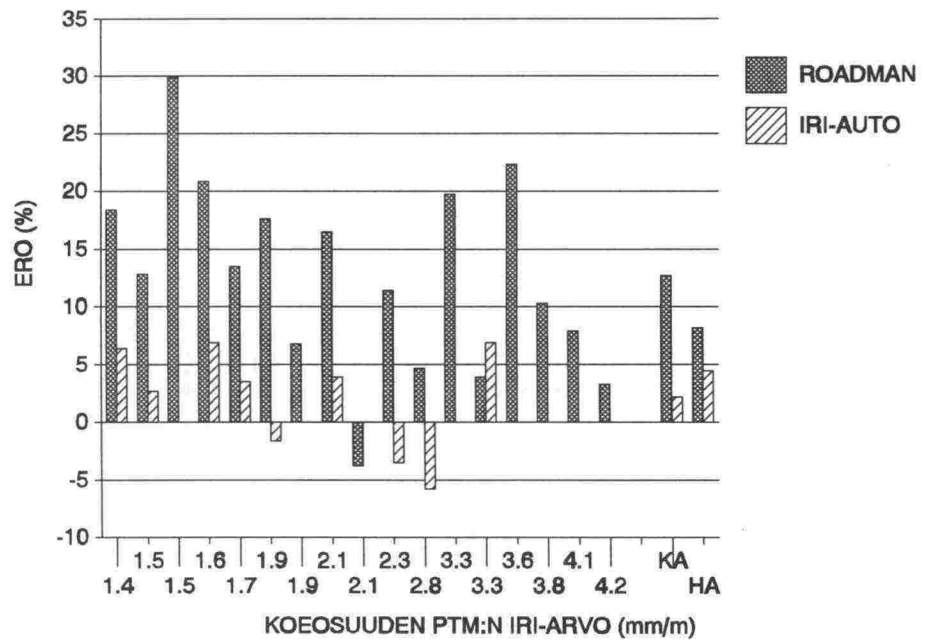
Käyräviivaisella kalibroinnilla päästäisiin mahdollisesti tarkempiin tuloksiin, mutta tällaisen mallien luotettavaa määrittämistä varten käytettävissä ollut aineisto oli liian pieni.



Kuva 7. Peruskoeosuuskien IRI-tulokset PTM:llä, IRI-autolla ja Roadmanilla.



Kuva 8. PTM-, IRI-auto- ja Roadman-mittaustulosten väliset absoluuttiset (mm/m) erot peruskoeosuuksilla.



Kuva 9. PTM-, IRI-auto- ja Roadman-mittaustulosten väliset suhteelliset (%) erot peruskoeosuuksilla.

4 TARKKOJEN KOEOSUUKSIEN TASAISUUSMITTAUKSET

Tarkempia mittauksia tehtiin viidellä lyhyellä (500 m) koeosuudella. Kohteet valittiin siten, että ne edustivat tasaisuudeltaan erityyppisiä teitä. Yhdellä koeosuuksista oli ajoneuvovaaka (WIM). Pituusprofiili mitattiin kultakin koeosuudelta 32 cm:n tallennusvälillä tehden kolme toistomittausta kummallakin mittalaitteella (PTM ja Roadman). Mittaukset tehtiin samanaikaisesti, jolloin pystyttiin mahdollisimman hyvin ajamaan samaa ajolinjaa. Näiltä viideltä koeosuudelta mitattiin tasaisuus sekä pituusprofiili. Jokaisen koeosuuden keskimmäisen 100 metrin pituusprofiili mitattiin myös Dipstickillä. Tästä profiilista laskettiin IRI-arvo jälkikäteen Dipstickin valmistajan laitteen mukana toimittamalla ohjelmalla. Dipstick-mittaus pyrittiin tekemään samaa pituussuuntaista linjaa pitkin kuin mittaukset autoillakin. Taulukossa 5 on esitetty koeosuudet sekä kullakin koeosuudella tehdyt mittaukset. Taulukossa 6 on esitetty koko 500 metrin tulokset kullakin koeosuudella ja taulukoissa 7, 8 ja 9 tulokset osuuksien keskimmäisillä 100 metreillä. Taulukoissa on esitetty PTM:n ja Roadmanin sekä Dipstickin IRI-arvot sekä laitteiden väliset erot.

Taulukko 5. Tarkkojen koeosuuksien mittaukset.

Tie/ koeosuus	Mittaus-no- peus	Toistot (kpl)	Tien kunto	Huomautuksia
53/1	80	3	Tasainen	Ajoneuvo- vaaka (WIM)
	60	1		
	40	1		
53/2	80	3	Tasainen	
	60	1		
	40	1		
143	80	6	Sekä lyhyt- että pitkäaaltoista epätasaisuutta	
	60	3		
	40	1		
170	80	6	Isoja heittoja	
	60	1		
	40	1		
1271	60	3	Lyhytaaltoista epätasaisuutta	
	40	1		

Taulukko 6. 500 metrin koeosuuksien tulokset ja laitteiden väliset erot (PTM - Roadman).

Koeosuus	IRI (mm/m) PTM	IRI (mm/m) Roadman	Ero (mm/m)	Ero (%)
53/1	1,20	1,38	0,18	13,0
53/2	1,46	1,83	0,37	20,2
1271	2,28	2,61	0,33	12,6
170	2,46	3,46	1,00	28,9
143	4,06	5,18	1,12	21,6
Keskiarvo			0,60	19,3
Hajonta			0,38	6,0

Taulukko 7. 100 metrin koeosuuksien tulokset ja laitteiden väliset erot (PTM - Roadman).

Koeosuus	IRI (mm/m) PTM	IRI (mm/m) Roadman	Ero (mm/m)	Ero (%)
53/1	0,89	0,96	0,07	7,3
53/2	1,06	1,22	0,16	13,1
1271	2,33	2,68	0,35	13,1
170	4,80	6,82	2,02	29,6
143	5,57	6,64	1,07	16,1
Keskiarvo			0,73	15,8
Hajonta			0,73	7,5

100 metrin koeosuuksilla PTM:llä nopeudella 60 km/h mitatuista profiileista on keskimmaisilta sadoilta metreiltä laskettu IRI-arvot VTT:ssä tehdyn Quarter Car Simulation (QCS) -ohjelmalla, joka on sama kuin PTM-autossa käytetty. Tulokset on esitetty taulukossa 10. Tuloksissa ei ole merkittävää eroa tien päällä tehtyihin mittauksiin verrattuna. Erot mahtuvat mittauksen hajonnan sisään.

Taulukko 8. 100 metrin koeosuuksien tulokset ja laitteiden väliset erot (PTM - Dipstick).

Koeosuus	IRI (mm/m) PTM	IRI (mm/m) Dipstick	Ero (mm/m)	Ero (%)
53/1	0,89	1,19	0,30	25,2
53/2	1,06	1,72	0,66	38,4
1271	2,33	3,36	1,03	30,7
170	4,80	5,01	0,21	4,2
143	5,57	5,91	0,34	5,8
Keskiarvo			0,51	20,8
Hajonta			0,30	13,6

Taulukko 9. 100 metrin koeosuuksien tulokset ja laitteiden väliset erot (Roadman - Dipstick).

Koeosuus	IRI (mm/m) Roadman	IRI (mm/m) Dipstick	Ero (mm/m)	Ero (%)
53/1	0,96	1,19	0,23	19,3
53/2	1,22	1,72	0,50	29,1
1271	2,68	3,36	0,68	20,2
170	6,82	5,01	-1,81	-36,1
143	6,64	5,91	-0,73	-12,4
Keskiarvo			-0,23	4,0
Hajonta			0,93	24,5

100 metrin koeosuuksilla kaikkien mittausten yhteinen selitysaste PTM- ja Roadman-mittausten osalla oli $r^2 = 0,98$, PTM:n ja Dipstickin välillä $r^2 = 0,98$ ja Roadmanin ja Dipstickin välillä $r^2 = 0,94$. Laitteet siis mittaavat samansuuntaisesti epätasaisuutta, vaikka pieniä tasoeroja eri mittareiden välillä onkin. Selitysasteet olivat erittäin korkeita.

Roadman antaa säännöllisesti hieman PTM-autoa korkeampia IRI-arvoja. Dipstick antaa pääsääntöisesti vielä Roadmaniakin suurempia arvoja, joskin

korkeilla IRI-arvoilla Roadmanin IRI-arvot ovat Dipstickiä suurempia. Selvää yhteyttä erojen ja IRI-arvon suuruuden välillä ei ole; ero ei kasva IRI-arvon kasvaessa.

On huomattavaa, että verrattaessa Dipstick-tuloksiin PTM-auto antaa eri koeosuuksilla saman järjestyksen kuin Dipstick. Roadman näyttää sen sijaan antavan korkeilla IRI-arvoilla eri järjestyksen.

Syy siihen, että Dipstick antaa korkeampia IRI-arvoja kuin PTM ja Roadman on osin se, että Dipstick-profiili on käytännössä täysin suodattamaton, eli jos tien pinnassa sattuu olemaan esimerkiksi pieni muutaman neliösenttimetrin suuruinen reikä, saattaa Dipstickin jalka osua tällaiseen reikään ja profiiliin tulee selvä muutos. PTM laskee profiilin kahdeksasta 40 mm:n välein otetusta lukemasta, jolloin tällainen yksittäinen epätasaisuus tasoittuu, ja profiilista tulee hieman "pehmeämpi". Vastaavasti Roadmanissa suodattimena toimii auton rengas, joka ei tunnista pieniä reikiä.

Lineaarisen regression avulla määritettiin yksinkertaiset matemaattiset mallit eri laitteiden IRI-tulosten välille koeosuuksien keskimmäisten 100 metrien aineiston perustella. Regressiosuorat sekä mallien keskivirheet (standard error of Y estimate, SEE) on esitetty alla. Ensimmäisellä kaavalla muutetaan PTM-mittaustulokset Dipstick-tuloksia vastaaviksi. Toisella kaavalla muutetaan puolestaan Dipstick-tulokset PTM-tuloksia vastaaviksi. Muut kaavat toimivat vastaavalla tavalla. Epätarkimmat esitetyistä malleista ovat muutokset Roadmanin ja Dipstickin välillä. Liitteessä 1.3 on regressiot esitetty kuvina.

$$\text{Dipstick} = 0,936 * \text{PTM} + 0,694 \quad \text{SEE} = 0,36 \quad r^2 = 0,98$$

$$\text{PTM} = 1,043 * \text{Dipstick} - 0,657 \quad \text{SEE} = 0,37 \quad r^2 = 0,98$$

$$\text{Dipstick} = 0,686 * \text{Roadman} + 0,926 \quad \text{SEE} = 0,59 \quad r^2 = 0,94$$

$$\text{Roadman} = 1,366 * \text{Dipstick} - 1,034 \quad \text{SEE} = 0,84 \quad r^2 = 0,94$$

$$\text{PTM} = 0,739 * \text{Roadman} + 0,223 \quad \text{SEE} = 0,38 \quad r^2 = 0,98$$

$$\text{Roadman} = 1,322 * \text{PTM} - 0,209 \quad \text{SEE} = 0,51 \quad r^2 = 0,98.$$

Näillä esitetyillä malleilla muutettiin peruskoeosuuksien Roadmanin IRI-arvot PTM-tuloksia vastaaviksi. Tällöin muutetut Roadman-arvot olivat noin 0,2 mm/m PTM-arvoja pienempiä. Pienillä IRI-arvoilla (alle 2 mm/m) malli toimi hyvin: erot olivat noin 0,05 mm/m, mutta suurilla IRI-arvoilla erot kasvoivat eli malli korjasi Roadman-arvoja liikaa alaspäin. Kun muutettiin sekä PTM- että

Roadman-tulokset Dipstick-arvoiksi, oli keskimääräinen ero edelleenkin noin 0,2 mm/m. Kun muutettiin peruskoeosuuksien tulosten perusteella tehtyjen mallien avulla Roadman-tulokset PTM-arvoiksi, pienenivät erot, mutta Roadmanin tulokset olivat edelleenkin suurempia keskimäärin 0,4 mm/m (ilman kalibrointia ero oli 0,6 mm/m). Tässäkin tapauksessa malli toimi paremmin pienillä IRI-arvoilla. Nämä tässä esitetyt mallit ovat epätarkkoja pienen aineiston johdosta. Peruskoeosuuksilta määritetyt mallit ovat suuremman aineistonsa takia tarkempia ja luotettavampia.

Näillä koeosuuksilla selvitettiin myös mittalaitteiden eri mittauskertojen toistettavuutta IRI-arvojen osalla. Tässä tapauksessa mitattava koeosuus oli 500 tai 100 metriä pitkä, ja eri toistomittausten välisiin eroihin vaikuttaa luonnollisesti se, että jokainen ajokerta ei välttämättä ollut ajolinjaltaan aivan samanlainen. Taulukossa 11 on esitetty eri koeosuuksien mittausten hajonnat PTM:llä ja Roadmanilla sekä 500 metrin osuuksilta että keskimmäisten 100 metrien osalta. Kuvassa 10 on esitetty 100 metrin koeosuuksien PTM:n ja Roadmanin eri toistomittausten keskiarvotulokset ja hajonnat sekä lisäksi Dipstick-mittausten tulokset. Dipstickillä ei tehty toistomittauksia. Kuvassa 11 on esitetty 500 metrin koeosuuksien mittausten keskiarvotulokset sekä hajonnat PTM-auton ja Roadmanin osalta.

Hajonnat olivat pieniä kummallakin mittalaitteella sekä 500 metrin että 100 metrin koeosuuksilla, vaikka kaikilla kohteilla toistojen määrä ei ollutkaan kovin suuri (4 - 10 kpl). Roadmanilla hajonta oli keskimäärin hieman PTM:n hajontaa suurempi.

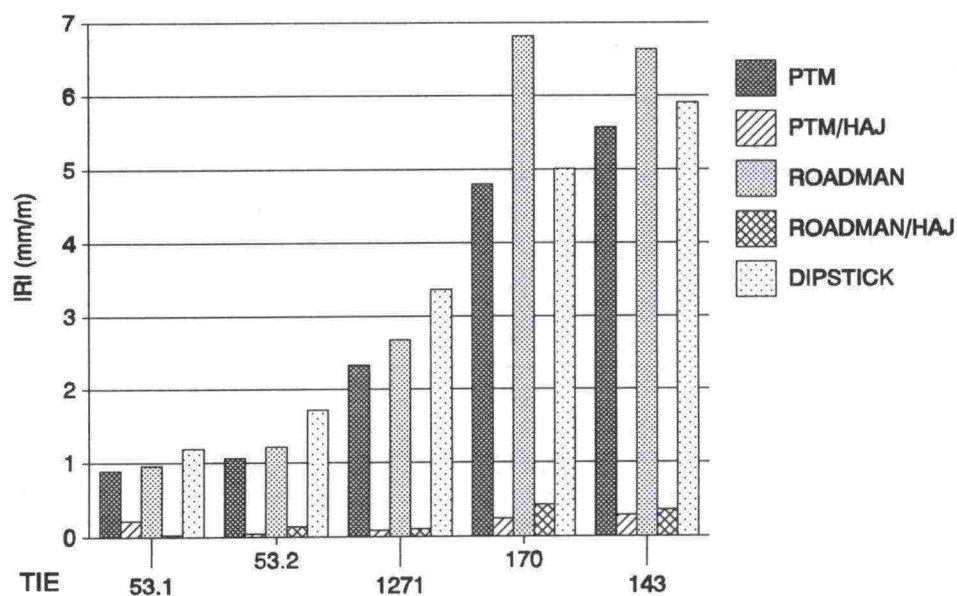
Mittauksia tehtiin kullakin koeosuudella eri nopeuksilla. Taulukoissa 12 ja 13 esitetään nämä tulokset. Tarkasteltaessa 500 metrin koeosuuksia nähdään, että eri mittausnopeuksien välillä on molemmilla laitteilla pieniä eroja. Alhaisilla nopeuksilla (60 ja 40 km/h) tehtiin kuitenkin vähän tai ei lainkaan toistomittauksia, mikä vaikeuttaa varmojen johtopäätösten tekemistä. Alhaisilla nopeuksilla saattaa mittaustuloksiin tulla hajontaa sen vuoksi, että mitä pienempi on nopeus sitä vaikeampi on säilyttää ajolinja aivan suorassa. Erot eri nopeuksien välillä saattavat hyvinkin aiheutua tästä ajolinjojen erosta. Erot eri nopeuksien välillä olivat PTM:llä pienemmät kuin Roadmanilla.

Taulukko 10. Mitatuista 100 metrin koeosuuksien profiileista jälkikäteen lasketut IRI-arvot (mm/m) ja niiden erot tien päällä mitattuihin verrattuna.

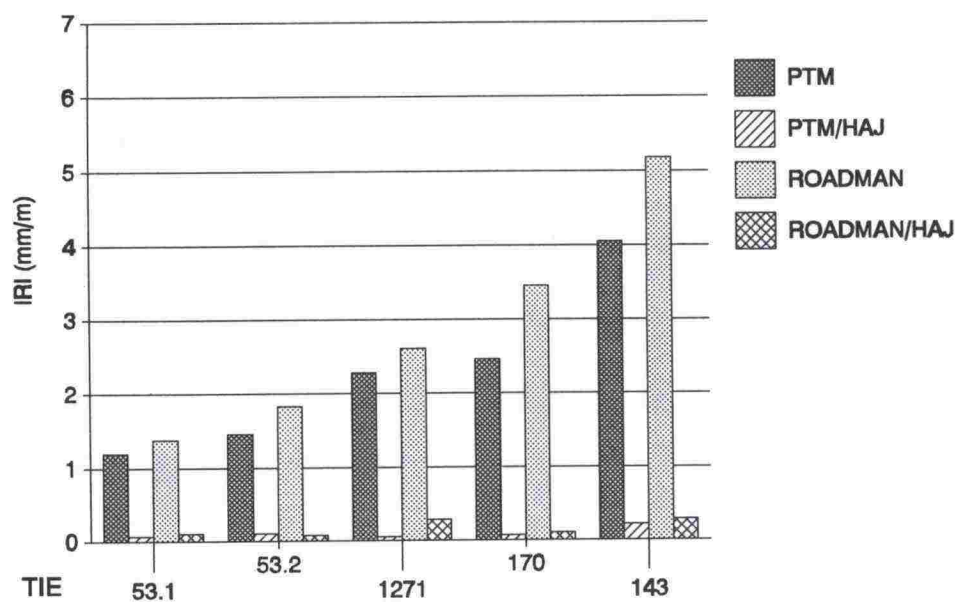
Koeosuus	IRI-arvo profiilista (mm/m)	Ero mitattuun	
		(mm/m)	(%)
53/1	0,79	-0,10	12,7
53/2	1,11	0,05	4,5
1271	2,40	0,07	2,9
170	4,57	0,23	5,0
143	5,83	0,24	4,1

Taulukko 11. 500 ja 100 metrin koeosuuksien IRI-mittausten toistojen hajonnat PTM-autolla ja Roadmanilla.

Koeosuus	Toistojen lukumäärä	500 m:n koeosuudet		100 m:n koeosuudet	
		PTM	Roadman	PTM	Roadman
53/1	5	0,07	0,11	0,22	0,03
53/2	5	0,11	0,08	0,05	0,14
1271	4	0,06	0,29	0,09	0,11
170	8	0,07	0,11	0,25	0,43
143	10	0,22	0,29	0,29	0,36



Kuva 10. 100 metrin koeosuuksien Dipstick-tulokset sekä PTM:n ja Roadmanin toistomittausten keskiarvotulokset ja absoluuttiset hajonnat.



Kuva 11. 500 metrin koeosuuksien toistomittausten keskiarvotulokset sekä hajonnat, PTM ja Roadman.

Taulukko 12. Mittausnopeuden vaikutus IRI-arvoon PTM-autolla 500 metrin koeosuuksilla.

Koeosuus	PTM-auto					
	80 km/h		60 km/h		40 km/h	
	LKM (kpl)	IRI (mm/m)	LKM (kpl)	IRI (mm/m)	LKM (kpl)	IRI (mm/m)
53/1	3	1,17	1	1,34	1	1,34
53/2	3	1,39	1	1,46	1	1,65
1271	-	-	3	2,25	1	2,39
170	6	2,48	1	2,38	1	2,44
143	6	3,98	3	4,14	1	4,25

Taulukko 13. Mittausnopeuden vaikutus IRI-arvoon Roadmanilla 500 metrin koeosuuksilla.

Koeosuus	Roadman					
	80 km/h		60 km/h		40 km/h	
	LKM (kpl)	IRI (mm/m)	LKM (kpl)	IRI (mm/m)	LKM (kpl)	IRI (mm/m)
53/1	3	1,46	1	1,32	1	1,22
53/2	3	1,86	1	1,90	1	1,67
1271	-	-	3	2,74	1	2,20
170	6	3,45	1	3,16	1	2,71
143	6	5,36	3	5,05	1	4,48

Sekä PTM-autolla että Roadmanilla pystytään tallentamaan laskennallinen IRI-automallin korin maksimikihtyvyys 100 metrin matkalla sekä sen paikka pituussuunnassa. Tarkastelemme yhden koeosuuden (mt 143) eri satojen metrien maksimikihtyvyyksiä ja niiden paikkoja sekä mittauksen toistettavuutta. Taulukoissa 14 ja 15 on esitetty sekä PTM:n että Roadmanin maksimikihtyvyyksien keskiarvotulokset ja hajonnat kullakin sadalla metrillä. Kiihtyvyyden paikasta esitetään sen moodi (otoksen useimmin esiintyvä arvo) sekä se, kuinka usein kiihtyvyys esiintyy em. kohdalla ± 2 metrin toleranssilla. Toistomittauksia tehtiin 10 kappaletta.

Taulukko 14. Laskennalliset IRI-automallin korin maksimikihtyvyydet sekä niiden paikat koeosuudella mt 143 kullakin 100 metrillä PTM-autolla mitattuna, 10 toistomittausta.

Koeosuus	Kiihtyvyys (m/s ²)		Paikka (m, kpl)	
	Keskiarvo	Hajonta	Moodi	Lukumäärä
0 - 100 m	2,3	0,3	50	8
100 - 200 m	1,7	0,2	122	8
200 - 300 m	4,6	0,5	249	10
300 - 400 m	4,3	0,4	315	8
400 - 500 m	2,7	0,6	449	7

Taulukko 15. Laskennalliset IRI-auton maksimikihtyvyydet sekä niiden paikat koeosuudella mt 143 kullakin 100 metrillä Roadmanilla mitattuna, 10 toistomittausta.

Koeosuus	Kiihtyvyys (m/s ²)		Paikka (m, kpl)	
	Keskiarvo	Hajonta	Moodi	Lukumäärä
0 - 100 m	1,1	0,2	41	5
100 - 200 m	1,0	0,2	116	7
200 - 300 m	1,9	0,2	242	7
300 - 400 m	2,6	0,3	307	8
400 - 500 m	2,0	0,1	427	6

PTM-autolla saadaan suurempia korikihtyvyyksiä kuin Roadmanilla. PTM:n kiihtyvyydet ovat lähes kaksinkertaisia. Roadmanin profiili on hieman pehmeäpiirteisempi; siinä ei ole niin paljon pieniä teräviä epätasaisuuksia kuin PTM-autolla mitatussa profiilissa. Roadmanin profiilin pehmeys johtuu joustavan renkaan tasoittavasta vaikutuksesta. Tällaiset pienet terävät huiput saattavat aiheuttaa suuria kiihtyvyyksiä, mikä selittäisi laitteiden väliset maksimikihtyvyyksien suuruuserot. Kummankin laitteen toistettavuus on hyvä ja maksimikihtyvyys löytyy useimmiten samasta paikasta eri ajokerroilla. Kiihtyvyyksien hajonnat olivat verrattain pieniä ja samaa luokkaa molemmilla laitteilla. PTM-auto löysi maksimikihtyvyyden paikan samalta kohdalta hieman useammin kuin Roadman. Se, ettei maksimi ollut joka ajokerralla samassa paikassa, johtunee siitä, että koeosuudella useammassa eri kohdassa syntyi lähes samansuuruisia kiihtyvyyksiä. Tällöin eri ajokerroilla suurin arvo sattui eri kohdille.

PTM ja Roadman löysivät maksimit kokolailla samoista paikoista. Roadmanilla paikka oli kuitenkin koko ajan vajaat 10 metriä lähempänä mittauksen aloituspistettä, vaikka niiden pitäisi olla lähes metrilleen samat.

Tällä koekohteella (mt 143) tehtiin myös kiihtyvyyksimittauksia suoraan sekä etuvetoisen että takavetoisen auton koriin kiinnitetyillä kiihtyvyyksiantureilla. Anturit oli kiinnitetty koriin taka-akselin yläpuolelle auton keskelle. Tulokset näistä mittauksista on esitetty taulukoissa 16 ja 17. Toistettavuus oli näilläkin mittauksilla hyvä. Kiihtyvyyksien hajonta oli tosin hieman suurempi kuin PTM-autolla ja Roadmanilla. Maksimikihtyvyyksien paikatkin olivat suunnilleen samoissa kohdissa kuin PTM:llä mitatut. Tällä tavoin mitattuna saatiin vielä suurempia kiihtyvyyksiä kuin PTM-autolla. Maksimien paikatkin poikkesivat edelleen hieman PTM:n ja Roadmanin määrittämistä paikoista. Paikat olivat pääasiassa 5 - 10 m edempänä kuin PTM:n paikat ja noin 10 - 15 m Roadmanin ilmoittamia paikkoja kauempana. Erot takavetoisen ja etuvetoisen auton välillä olivat selviä eli auton rakenteella on vaikutusta kiihtyvyyksimittaus-tuloksiin.

Selitysasteet eri laitteiden maksimikihtyvyyksien suuruuksien välillä eivät olleet kovin korkeita. PTM:n ja Roadmanin välinen selitysaste oli 0,64. Etuvetoisen auton korista mitattujen kiihtyvyyksien kanssa kumpikin laite korreloi kohtalaisesti (selitysaste 0,67), mutta takavetoisen auton korin kiihtyvyyksiin verrattuna korrelaatio oli huono (selitysasteet: PTM 0,08, Roadman 0,33). Etu- ja takavetoisen auton korin kiihtyvyyksien välinen selitysaste oli 0,58.

Taulukko 16. Maksimikihtyvyydet sekä niiden paikat koeosuudella mt 143 kullakin 100 metrillä suoraan takavetoisen auton korista taka-akselin päältä kiihtyvyyssanturilla mitattuna, 10 toistomittausta. Autossa oli jäykennetty alusta.

Koeosuus	Kiihtyvyys (m/s ²)		Paikka (m, kpl)	
	Keskiarvo	Hajonta	Moodi	Lukumäärä
0 - 100 m	2,9	0,6	56	8
100 - 200 m	5,0	1,2	130	8
200 - 300 m	3,8	0,2	230	7
300 - 400 m	6,2	1,1	325	8
400 - 500 m	4,2	1,0	440	9

Taulukko 17. Maksimikihtyvyydet sekä niiden paikat koeosuudella mt 143 kullakin 100 metrillä suoraan etuvetoisen auton korista taka-akselin päältä kiihtyvyyssanturilla mitattuna, 10 toistomittausta.

Koeosuus	Kiihtyvyys (m/s ²)		Paikka (m, kpl)	
	Keskiarvo	Hajonta	Moodi	Lukumäärä
0 - 100 m	3,9	0,6	55	9
100 - 200 m	4,7	0,8	129	8
200 - 300 m	5,6	1,3	261	7
300 - 400 m	6,4	0,6	321	7
400 - 500 m	4,6	0,5	437	7

5 TARKKOJEN KOEOSUUKSIEN PROFIILIMITTAUKSET

500 metrin mittaisilta koeosuuksilta mitattiin ja tallennettiin pituusprofiilit 32 cm:n välein sekä PTM-autolla että Roadmanilla. Toistomittauksia tehtiin 3 kpl. Dipstickillä mitattiin yhden kerran koeosuuksien keskimmäisten satojen metrien profiilit. Kullakin laitteella pituusprofiili mitattiin niin hyvin samaa linjaa pitkin kuin se oli mahdollista. Näitä keskimmäisiä 100 metrin osuuksien profiileja voitiin vertailla eri laitteiden välillä. Myös Roadmanin ja PTM:n mittaamien profiilien toistettavuutta tarkasteltiin. Kaikkia mitattuja profiileja on suodatettu siten, että yli 30 metrin aallonpituudet on niistä poistettu (viidentoista metrin liukuva keskiarvo), jotta eri laitteiden profiilit olisivat keskenään vertailukelpoisia. PTM:n ja Dipstickin osalla suodatus tehtiin jälkikäteen, Roadmanin profiili oli jo valmiiksi suodatettu. Suodatukset eivät ole välttämättä aivan samanlaisia. Liitteissä 2.1 - 2.5 on esitetty mitattuja profiilikuvia.

PTM-autolla ja Dipstickillä saadaan tallennettua suoraan pituusprofiili pystysiirtymänä. Roadmanilla tallennetaan pystynopeuden profiili, joka pitää jälkikäteen matemaattisesti muuttaa siirtymäprofiiliksi. Profiilien vertailuja haittasi hieman tämä asia, koska muutettaessa Roadmanin nopeusprofiilia siirtymäprofiiliksi, ei pystysuoraa skaalauskerrointa tarkoin tiedetty. Käytetty skaalauskerroin oli ilmeisesti hieman liian pieni, ja näin profiilien korkeuserot olivat myös jonkin verran liian pieniä. Profiileja vertailtaessa tarkasteltiin kaikkien laitteiden osalla keskimmäisiä sadan metrin osuuksia. Mittaushetkellä Roadman kuitenkin laskee siirtymäprofiiliin oikealla skaalaukertoimella, joten mittarin tuottamat tunnusluvut on laskettu oikeanmuotoisesta pituusprofiilista.

Profiilin mittaustavasta johtuen Dipstickin profiilit ovat teräväpiirteisimmät. Pienetkin kolot päällysteessä näkyvät Dipstickin profiilissa, koska se ei suodatu lainkaan aivan lyhyillä aallonpituuksilla. PTM:n profiili suodattuu hieman, koska 32 cm:n välein tulostuva arvo on kahdeksan neljän cm:n välein mitatun luvun keskiarvo ja Roadmanilla muutaman senttimetrin epätasaisuus häviää renkaan tasoittavaan vaikutukseen. Roadman näyttäisi tasoittavan aivan pieniä epätasaisuuksia vielä PTM-autoa enemmän.

Sekä PTM:n että Roadmanin profiilien toistettavuus oli hyvä kuten liitekuvista voidaan hyvin havaita. Kummallakin laitteella mitatuissa profiileissa eri toistomittauksilla profiilien muodot ovat lähestulkoon samanlaisia ja käännepeisteet ovat samoilla kohdilla. Muutokset profiileissa ovat myös pystysuunnassa eri ajokerroilla saman suuruisia.

Aivan yhtä hyvin profiilien muodot ja muutokset eivät käy yksiin eri laitteiden välillä, vaikka profiilien päälinjat ovatkin samanlaisia. Erot ovat lähinnä pienten epätasaisuuksien osalla. Tällaiset pienet erot johtuvat sangen todennäköisesti

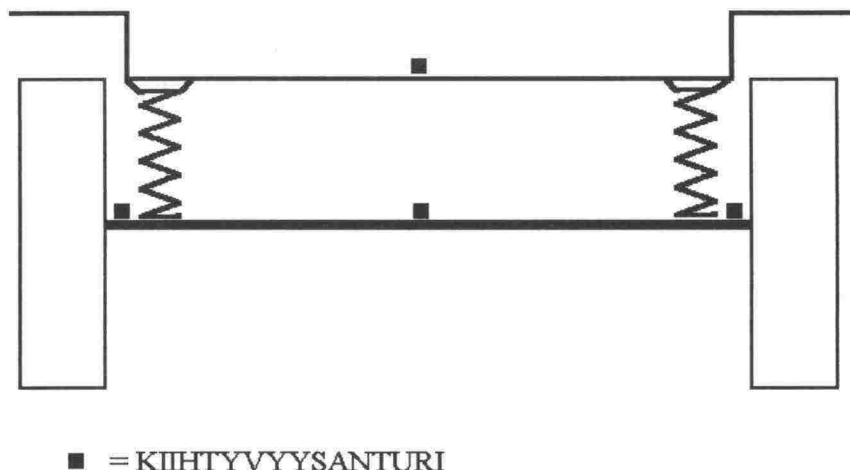
vähäisistä mittauslinjojen eroista. Suuret heitot ovat kaikissa profiileissa suunnilleen samansuuruisia samoissa kohdissa.

Nämä profiilikuvatarkastelut käyvät hyvin yksiin IRI-mittaustulosten kanssa. Sekä PTM:n että Roadmanin mittausten toistettavuus on hyvä, mutta laitteiden välillä on pieni ero, kuten myös Dipstickiin verrattuna.

Profiileista tarkasteltiin myös epätasaisuuksien taajuusjakaumia (liitteet 3.1 - 3.3). Tällä tavalla pyrittiin selvittämään, korostaako jokin mittalaite jotain erityistä aallonpituusaluetta muita enemmän ja täten aiheuttaisi eroja IRI-arvoihin. Mitään tällaista ilmiötä jakaumissa ei kuitenkaan ollut havaittavissa. Dipstickin taajuusjakaumakuva oli lähes säännöllisesti kaikilla taajuuksilla hieman PTM-auton jakaumakuva korkeammalla tasolla, mikä on johdonmukaista, koska se antaa myös suurempia IRI-arvoja kuin PTM-auto. Roadman sen sijaan oli koko ajan alhaisimmalla tasolla, mutta se johtunee aiemmin mainitusta virheellisestä skaalauskerroimesta. Pieniä eroja jakautumisissa oli, mutta näiden erojen perusteella ei voinut havaita minkään laitteen korostavan jotain tiettyä aallonpituutta.

6 ERILLISET KIIHTYVYYSMITTAUKSET

Kiihtyvyyssmittauksilla pyrittiin selvittämään, minkälaisia pystykiihtyvyyksiä syntyy päällysteen epätasaisuuden aiheuttamana auton akseleille ja koriin. Tutkimuksessa pyrittiin selvittämään kuinka auton erilainen akselistorakenne sekä anturin sijainti vaikuttavat saataviin tuloksiin, kun mittaus perustuu henkilöauton taka-akselilta mitattavaan pystykiihtyvyyteen. Tätä tarkoitusta varten asennettiin sekä tutkimuksessa mukana olevaan Roadmanilla varustettuun taka-vetoiseen (Volvo 244) että tyypillisellä jäykällä taka-akselilla varustettuun etuvetoiseen (Nissan Sunny farmari) henkilöautoon kolme kiihtyvyyssanturia. Anturien sijainti akselilla on esitetty kuvassa 12. Akselilla olevista antureista kaksi sijoitettiin mahdollisimman lähelle pyörää (noin 10 cm pyörälinjasta) ja yksi anturi keskelle akselia. Lisäksi asennettiin koriin keskelle taka-akselin päälle herkempi kiihtyvyyssanturi mittaamaan samanaikaisesti korin pystykiihtyvyyttä.

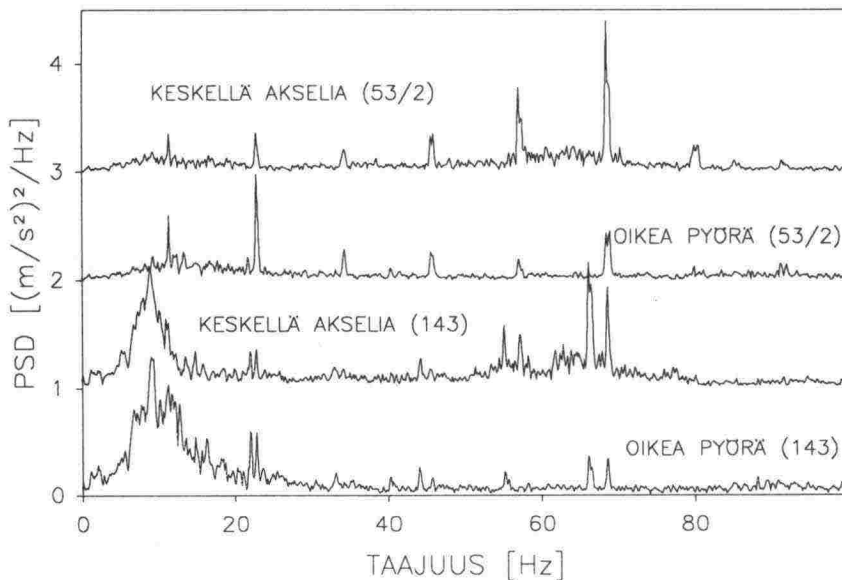


Kuva 12. Erillisissä kiihtyvyyssmittauksissa käytettyjen kiihtyvyyssantureiden sijainti henkilöauton taka-akselilla ja korissa.

Mittaustiedot kerättiin 386-prosessorilla varustetulla mikrotietokoneella, ja siihen asennetulla DT2805-tiedonkeruukortilla. Signaalin vahvistamiseen käytettiin Kyowan DPM611A-vahvistimia. Myös kiihtyvyyssanturit olivat Kyowan valmistamia, akselilla tyyppiä AS-20GP ja korissa tyyppiä AS-2C. Mittauksissa näytteenottotaajuutena oli 300 Hz, mittauksen yhteydessä signaalia suodatettiin analogisella 100 Hz:n alipäästösuodattimella.

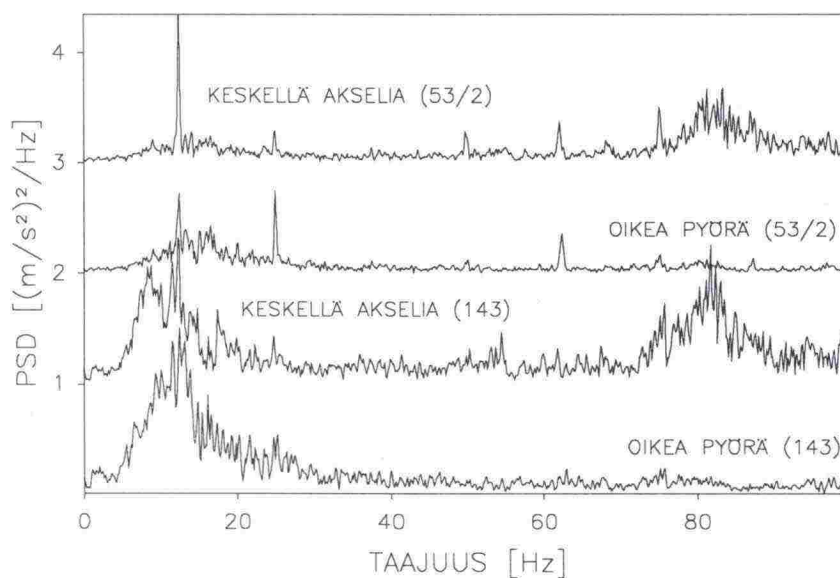
Kiihtyvyyshmittaukset tehtiin kaikilla tarkoilla 500 m:n koeosuuksilla (53/1, 53/2, 143, 170 ja 1271) ja tarkempi tulosten käsittely keskimmäiseltä 100 m:n osuudelta. Mittausnopeuksina oli 80, 60 ja 40 km/h paitsi Nummi-Pusulan koeosuudella (1271), jossa tien mutkaisuuden takia ei mitattu nopeudella 80 km/h. Lisäksi tehtiin vähintään kolme toistomittausta suurimmalla mittausnopeudella. Etuvetoisella autolla mittaukset suoritettiin koeosuuksilla 53/2 (tasaisin) ja 143 (epätasaisin).

Tiestä tulevien herätteiden lisäksi sekä renkaiden pienetkin epätasapainot ja epäpyöreyydet että akselin omat värähtelyt aiheuttavat akselille ylimääräisiä kiihtyvyyksiä. Takavetoisella autolla kiihtyvyyksiä syntyy myös voimansiirrosta. Toisaalta takavetoisen auton taka-akseli on huomattavasti jäykempi kuin etuvetoisen auton taka-akseli, mikä ilmenee vähäisempinä korkeataajuuksisina kiihtyvyyksinä. Kuvassa 13. on takavetoisen auton taka-akselin pystykiihtyvyyksien tehospektrit oikealta pyörältä ja akselin keskeltä sekä koeosuudelta 143 että 53/2 mitattuna. Koeosuuden 53/2 lasketuissa spektreissä korostuu tien tasaisuudesta johtuen vetopyörästä ja pyörän pyörinnästä aiheutuvat taajuudet (noin 11 Hz:n kerrannaistaajuuudet 22, 33,...Hz). Kohteen 143 spektreissä erottuvat myös akselin taipumavärähtelyt keskianturilta selvästi (60 - 70 Hz). Tasaisella tiellä keskellä akselia oleva kiihtyvyyssanturi mittaakin suurelta osin autosta syntyviä kiihtyvyyksiä.



Kuva 13. Takavetoisen auton taka-akselin kiihtyvyyksien tehospektrit oikealta pyörältä ja keskeltä akselia nopeudella 80 km/h. Koeosuudet 53/2 ja 143.

Kuvassa 14. on vastaavat etuvetoisen auton taka-akselin tehospektrit. Kevyemmän akselikonstruktion takia keskellä akselia on hyvin voimakkaita taipumavärähtelyitä (75 -85 Hz). Akselin pienemmän massan ansiosta (akseli ei ole vetävä ts. ei tarvita vetopyörästä yms.) myös keskianturilta voidaan erottaa tiestä syntyvät kiihtyvyyden taajuuskomponentit (alle 30 Hz).



Kuva 14. Etuvetoisen auton taka-akselin kiihtyvyyksien tehospektrit oikealta pyörältä ja keskeltä akselia nopeudella 80 km/h. Koeosuudet 53/2 ja 143.

Liitteissä 4.1 - 4.7 on esitetty kiihtyvyyksien maksimiarvot antureittain ennen ohjelmallista suodatusta kultakin tarkkojen koeosuuksien 100 m:n matkalta. Kultakin ajonopeudelta 80, 60 ja 40 km/h on laskettu toistomittauksien keskiarvo. Niistä havaitaan, että varsinkin epätasaisella koeosuudella (143) akselin eri kohdilla pystykiihtyvyyden maksimiarvot poikkeavat huomattavastikin toisistaan. Syynä tähän voidaan pitää oikeassa pyöräurassa olleita selviä painumia, jotka aiheuttivat eroa eri pyöräurien pituusprofileihin. Myös koeosuuden 170 kohoumat välillä 200 - 300 m aiheuttivat vastaavan ilmiön.

Etuvetoisen auton taka-akselin pystykiihtyvyyksien maksimit ovat takavetoisen auton arvoja korkeampia. Taulukossa 18. on esitetty koeosuuksilta 53/2 ja 143 mitattujen etuvetoisen auton pystykiihtyvyyksien maksimiarvojen (500 m:n koeosuuden satojen metrien keskiarvona) erot prosentteina takavetoisen

auton mitattuihin kiihtyvyyksiin verrattuna. Etuvetoisen auton taka-akselin pystykiehtyvyydet ovat tasaisella tiellä (53) keskellä akselia jopa 100 % suurempia kuin takavetoisella autolla.

Taulukko 18. Etuvetoisen auton mitattujen pystykiehtyvyyksien maksimiarvojen erot (%) takavetoiseen autoon verrattuna.

Koeosuus Nopeus	Oikea pyörä	Keskellä akselia	Vasen pyörä	Kori
53/2				
80 km/h	39	101	44	23
60 km/h	46	77	49	8
40 km/h	35	51	17	-7
143				
80 km/h	23	64	45	8
60 km/h	19	33	28	6
40 km/h	41	68	41	36

Varsinkin tasaisella tiellä etuvetoisen auton pystykiehtyvyydet ovat herkempiä nopeuden muutokselle. Taulukossa 19. on esitetty koeosuuksilta 53/2 ja 143 sekä takavetoisen että etuvetoisen auton pystykiehtyvyyden maksimiarvojen muutosprosentit (500 m:n koeosuuden satojen metrien keskiarvona), kun ajonopeutta on vähennetty 80:stä 40:een km/h.

Taulukko 19. Nopeuden vähentämisen (80:stä 40:een km/h) vaikutus (%) mitattuihin pystykiehtyvyyksiin taka- ja etuvetoisella autolla.

Koeosuus Auto	Oikea pyörä	Keskellä akselia	Vasen pyörä	Kori
53/2				
Takaveto	0	-18	-15	-22
Etuveto	-18	-39	-33	-41
143				
Takaveto	-27	-44	-36	-43
Etuveto	-30	-41	-40	-29

Liikkuvan auton taka-akselilla on paljon tiemittauksia haittaavia kiihtyvyyden taajuuskomponentteja, jolloin on erittäin tärkeää suodattaa tarpeettomat taajuudet pois. Tässä tutkimuksessa mukana oleville laitteille IRI-mittaus on

yksi tärkeimpiä tehtäviä. IRI:ä tien pituusprofiilista laskettaessa otetaan huomioon vain 0,3 - 30 m:n aallonpituudet. Tämän takia kiihtyvyyssmittaustulokset suodatettiin jälkikäteen ohjelmallisesti mahdollisimman jyrkillä 0,5 Hz ylipäästö- ja 40 Hz alipäästösuodattimilla. Taka-akselin eri kohtien sekä korin pystykiihtyvyyksien maksimi-arvot suodatuksen jälkeen on esitetty liitteissä 4.8 - 4.11.

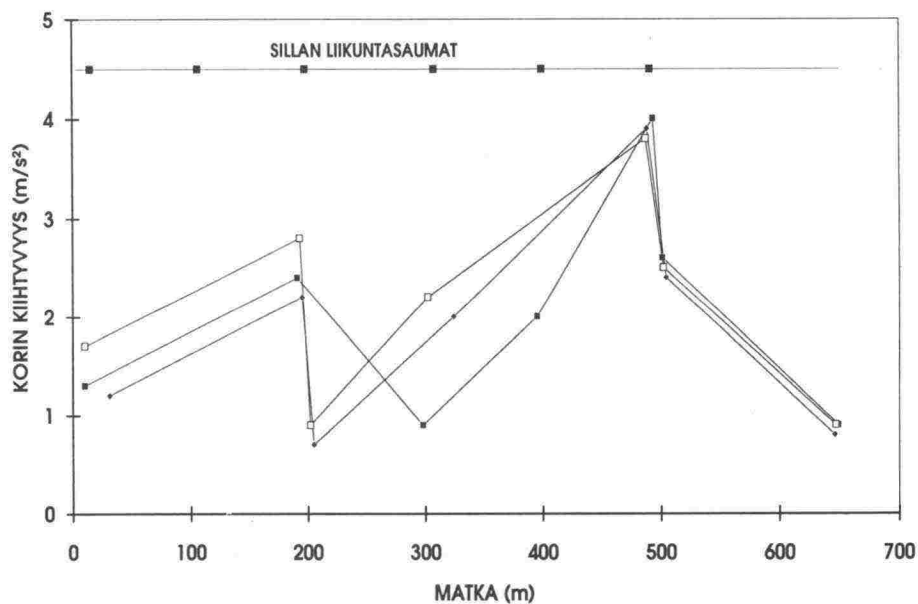
Suodatuksen vaikutus on erityisen selvä keskellä akselia olevan anturin maksimi-arvoissa. Tasaisella koeosuudella (53/2) etuvetoisen auton kiihtyvyyden maksimi-arvot putosivat jopa puoleen suodatuksen takia. Takavetoisen auton taka-akseli on jäykempi, mikä näkyy myös suodatuksen pienemmästä vaikutuksesta kiihtyvyyden maksimi-arvoihin. Suodatuksen vaikutus prosentteina (500 m:n koeosuuden satojen metrien keskiarvona) on esitetty koeosuuksilta 53/2 ja 143 taulukossa 20.

Taulukko 20. Suodatuksen (0,5 Hz ylipäästö- ja 40 Hz alipäästösuodatus) vaikutus (%) mitattujen kiihtyvyyksien maksimi-arvoihin taka- ja etuvetoisella autolla. Koeosuudet 53/2 ja 143.

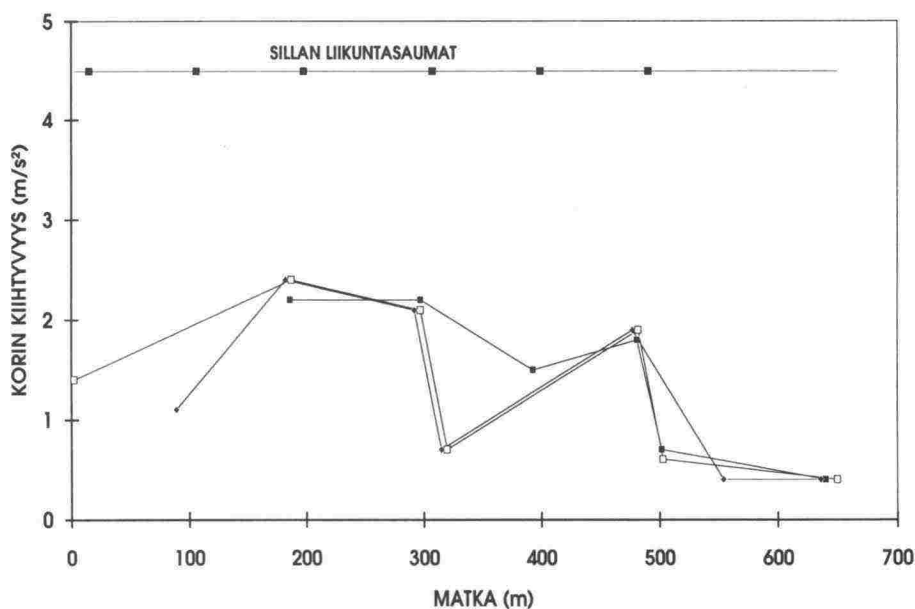
Koeosuus No-peus	Oikea pyörä	Keskellä akselia	Vasen pyörä	Kori
53/2	Takaveto			
80 km/h	-14	-35	-16	-16
60 km/h	-9	-27	-12	-22
40 km/h	-3	-27	-11	-19
143	Takaveto			
80 km/h	-13	-29	-15	-10
60 km/h	-14	-22	-19	-10
40 km/h	-11	-13	-14	-8
53/2	Etuveto			
80 km/h	-12	-52	-7	-9
60 km/h	-12	-34	-5	-14
40 km/h	-11	-49	32	-15
143	Etuveto			
80 km/h	-12	-32	-15	-5
60 km/h	-12	-23	-9	-3
40 km/h	-6	-34	-7	-7

PTM-autolla ja Roadmanilla mitattiin kiihtyvyyksiä vt 2:lla Vihdin ja Ojakkalan välillä olevien siltöjen kohdilla. Selvitettiin, minkälaisia kiihtyvyyshuippuja siltöjen liikuntasauinat aiheuttavat sekä, kuinka hyvin saumöjen paikat täsmäävät. Erkki Matilainen on väitöskirjassaan esittänyt samasta kohteesta Autolog-laitteella mitattuja tuloksia. PTM:n ja Roadmanin kiihtyvyydet ovat laskennallisia IRI-automallin kiihtyvyyksiä ja Autologin kiihtyvyydet taka-akselin kiihtyvyyksiä.

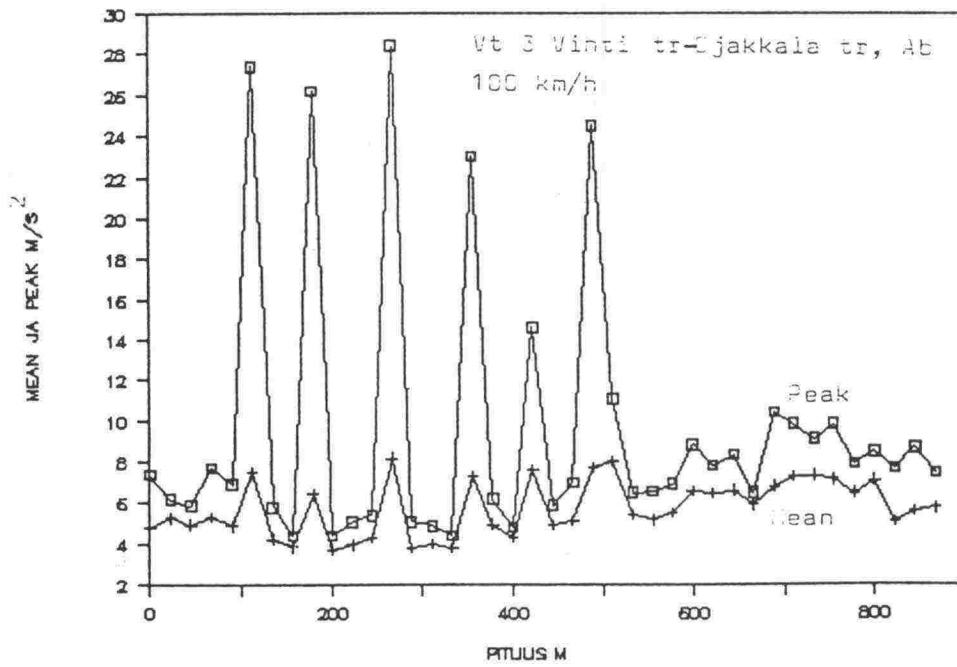
Kunkin laitteen mittaustulokset on esitetty kuvissa 15 - 17. PTM:llä ja Roadmanilla tehtiin kolme toistomittausta. PTM:llä ja Roadmanilla saatiin yksi kiihtyvyyshuippu sadalle metrille ja Autologilla yksi huippu jokaisen sekunnin aikana (matka riippuvainen mittaussnopeudesta). Sekä PTM:llä että Roadmanilla ajettiin kolme toistomittausta, jöiden mukaan toistettavuus oli hyvä. Kumpikin laite löysi liikuntasauinat melko tarkasti samoilta kohdilta noin 100 metrin välein kuten siltarekisterin piirustusten mukaan liikuntasauinat sijaitsivatkin. Ensimmäisen ja viimeisen liikuntasauinan välinen etäisyys oli 475 m. Saumöjen aiheuttamat kiihtyvyydet auton koriin olivat PTM-autolla 1 - 4 m/s² ja Roadmanilla 1 - 2,5 m/s². PTM:llä saatiin siis tässäkin tapauksessa hieman suurempia kiihtyvyyksiä (vrt. luku 4). Autologilla mitatut akselin kiihtyvyydet olivat liikuntasauinöjen kohdilla 15 - 25 m/s². Autolog-laitteen kiihtyvyyshuippujen paikantaminen ei täsmännyt muiden laitteiden kanssa eikä se täsmännyt myöskään sillan piirustuksiin, kuten muiden laitteiden osoittamat paikat. Autologilla ensimmäisen ja viimeisen liikuntasauinan välinen etäisyys oli vain noin 400 m. Akselilta mitatut kiihtyvyydet olivat lähes kymmenkertaisia korin kiihtyvyyksiin verrattuna.



Kuva 15. Vt 2:lla PTM-autolla siltojen liikuntasaumojen kohdilta mitattuja IRI-automallin korin kiihtyvyyksiä (kolme toistomittausta).



Kuva 16. Vt 2:lla Roadmanilla mitatusta profiilista siltojen liikuntasaumojen kohdilta laskettuja IRI-automallin korin kiihtyvyyksiä.



Kuva 17. Vt 2:lla Autologilla mitatusta profiilista siltojen liikuntasauvojen kohdilta laskettuja IRI-auton taka-akselin kiihtyvyyksiä /2/.

7 DYNAAMINEN RASITUSINDEKSI JA SEN TULOKSET

Dynaamisen rasitusindeksin laskemista varten on tutkimuksessa mukana olevissa PTM-autossa ja Roadmanissa matemaattinen neljännesautomalli, joka laskee mitatulle tienprofiilille dynaamiset lisäkuormat. Dynaamisella lisäkuormalla tarkoitetaan hetkellisen dynaamisen ja staattisen akselipainon erotusta. Dynaaminen kuormitus aiheutuu tien epätasaisuudesta, ja siihen vaikuttaa myös auton jousitus. PTM-autossa voidaan dynaaminen lisärasitus laskea samalla pistevälillä 32 cm kuin tien pituusprofiilikin tulostetaan. Lisärasituksen laskentaan käytetään vastaavaa neljännesautosimulointimallia kuin dynaamista lisärasitusta jälkikäteen simuloitaessa (QCS-simulointiohjelma) käytetään.

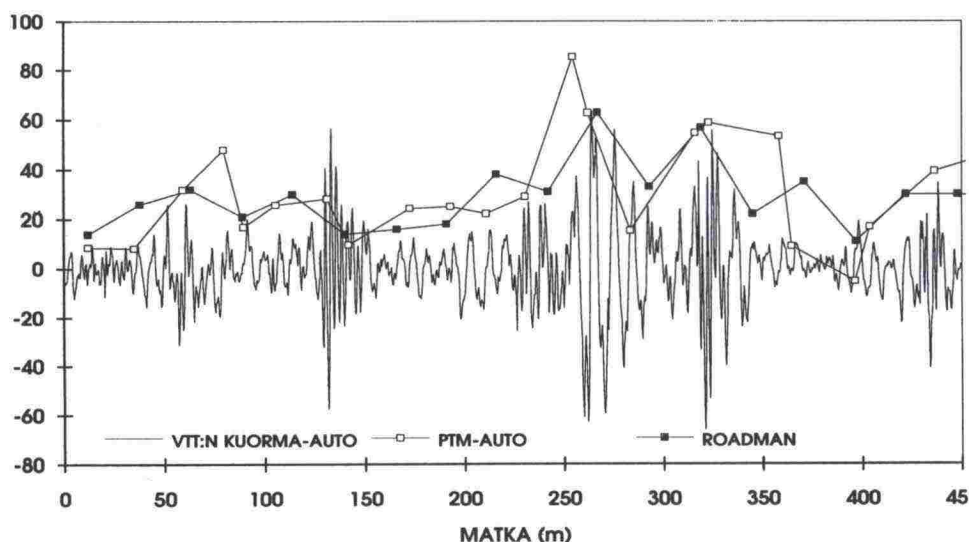
Vertailumittausten aikana PTM-auton dynaamisen lisärasituksen laskentaohjelma oli ohjelmoitu laskemaan kullekin sadalle metrille dynaamisen rasitusindeksin keskiarvo sekä maksimiarvo ja maksimiarvon sijainti. Rasitusindeksiä laskettaessa käytettiin hyväksi ns. neljänneksen potenssin sääntöä. Tällöin saatiin suoraan kullekin sadalle metrille keskimääräinen kuorma-auton akselin aiheuttama tierakenteen rasittuminen indeksilukuna. Myöhemmin on osoittautunut, että PTM-auton laskema dynaaminen rasitusindeksin keskiarvo kutakin sataa metriä kohti ei kuvaa riittävässä määrin tielle sen epätasaisuudesta aiheutuvaa dynaamista lisärasitusta. Tästä syystä on aloitettu projekti dynaamisen rasitusindeksin kehittämiseksi.

Myös Roadman käyttää neljännesautomallia (GM Truck Model) dynaamisen lisärasituksen laskemiseen. Laskentakapasiteetin rajallisuuden takia tulos saadaan Roadmanissa yhden sekunnin välein, mikä vastaa 22 metriä mittausnopeudella 80 km/h. Vastaavasti VTT:n kuorma-autolla voidaan mitata dynaamisia lisäkuormia kultakin akselilta halutuilla kuormilla ja ajonopeuksilla mittauspisteiden välin ollessa minimissään 1,5 cm (vrt. luku 8 Dynaamiset akselipainot).

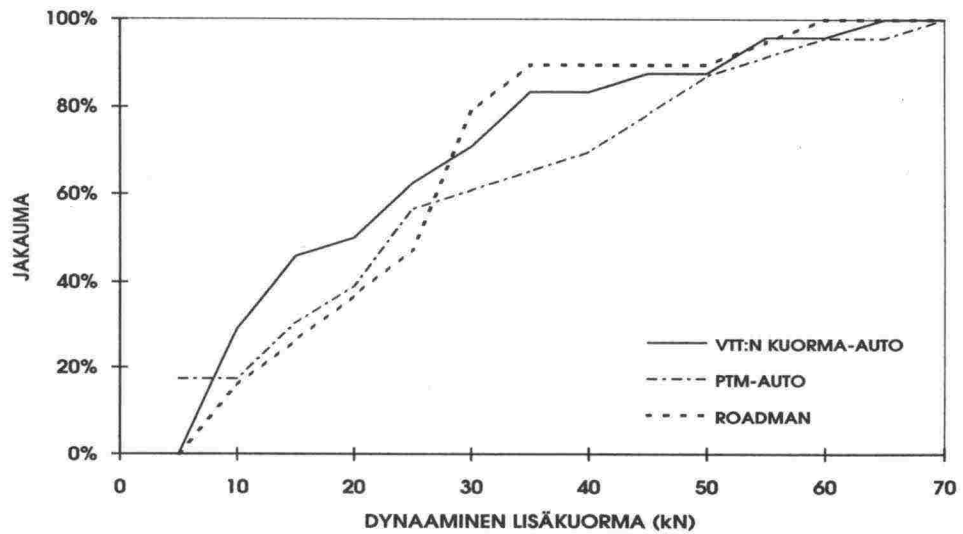
Laboratoriossa voidaan tietokoneella simuloida (Quarter Car Simulation) neljännesautomallin aikaansaamia dynaamisia akselipainoja halutuilla tieprofiileilla, ajonopeuksilla ja pisteväleillä. Mallin parametreja voidaan vaihtaa vastaamaan erilaisia kuorma-auton jousituksia sekä kuormia. Neljännesautomalli on hyvin yksinkertaistettu malli todellisesta kuorma-autosta. Se ei pysty ottamaan huomioon esim. korin todellisia liiketiloja (nyökintä, kallistelu), jousien kitkasta aiheutuvaa hystereesiä yms. Toisaalta yksinkertainen malli mahdollistaa reaaliaikaisen dynaamisten tierasitusten laskennan tien profiilimittausten yhteydessä.

Yksityiskohtaista simulointia varten VTT:llä on käytettävissä ADAMS-ohjelmisto, johon on mallinnettu todellinen neliakselinen kuorma-auto. Tässä kolmiulotteisessa mallissa vain moottorin runkoa vääntävä vaikutus on jätetty pois (sekin on täysin mahdollista lisätä malliin). Suuren laskenta-ajan takia näin raskas simulointimalli soveltuu vain erityistapauksiin, kuten dynaamisten akselipainojen toistuvuuden tutkimiseen /19 - 20/. Kuorma-auton ajomukavuuden kehittämisessä ko. malli on osoittautunut hyödylliseksi, ja tehdyt simuloinnit ovat vastanneet erittäin hyvin mittauksia.

Kuvassa 18. on VTT:n kuorma-auton vetoakselin dynaaminen lisäkuorma, Roadmanilla mitattu dynaaminen lisärasitus sekä PTM-autosta saatava dynaaminen lisäkuorma (QCS-simulointi) koeosuudelta 143. Kuvaan on haettu PTM-auton osalta maksimit 20 metrin (tarvittaessa mahdollista 32 cm:n välein) peräkkäisiltä osilta. Sekä PTM-auton että Roadmanin antamat lisärasitukset ovat samansuuntaisia kuin kuorma-auton akselilta mitattu dynaaminen lisäkuorma. Roadman korostaa pienempien epätasaisuuksien aiheuttamaa dynaamista lisärasitusta. PTM-auto korostaa isompien epätasaisuuksien aiheuttamaa dynaamista lisärasitusta. VTT:n kuorma-auton ja PTM-auton dynaamisten lisäkuormien maksimien (20 metrin matkalta) sekä Roadmanin antamien lisärasitusten kumulatiiviset jakaumat on esitetty kuvassa 19. Siitä voidaan nähdä, että Roadman korostaa dynaamista lisärasitusta erityisesti alueella 25 - 30 kN (koeosuudella 143).



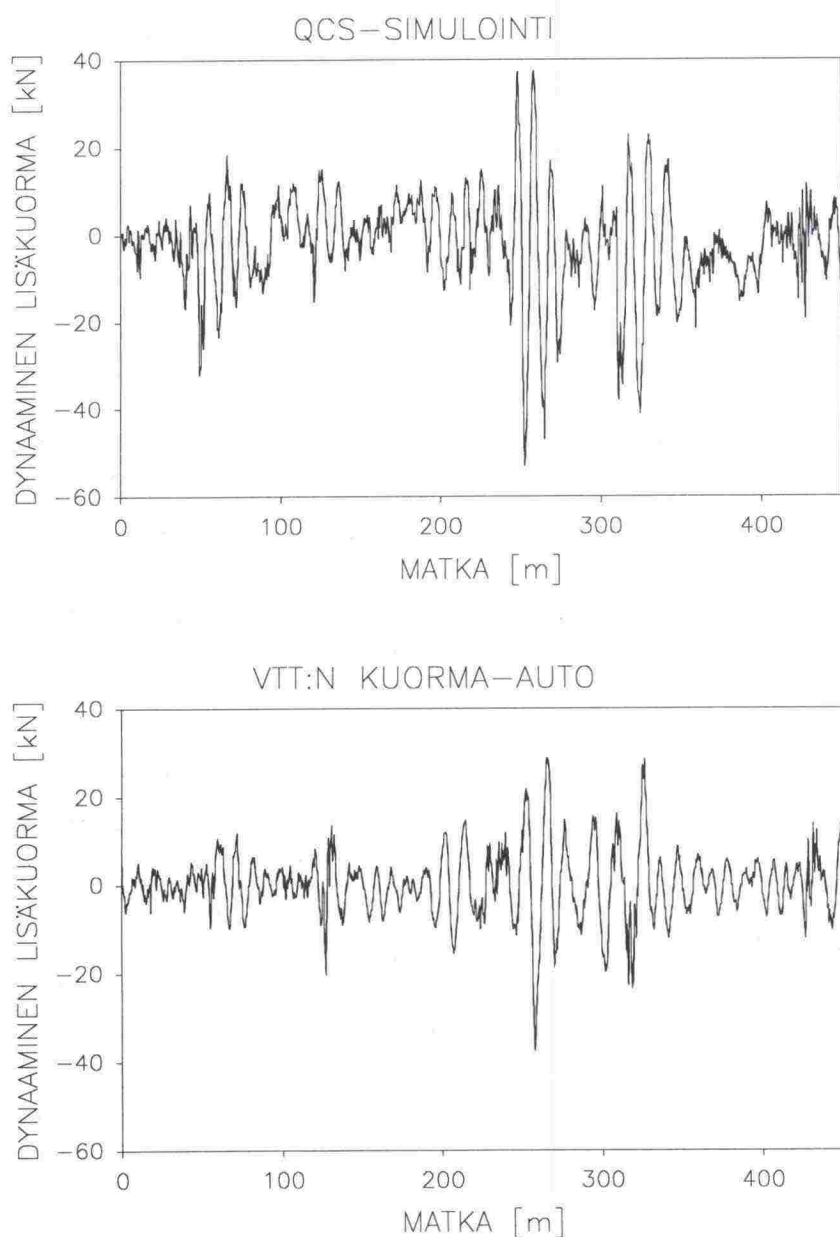
Kuva 18. Roadmanilla ja VTT:n kuorma-auton vetoakselilta mitatut sekä PTM-auton (QCS-simulointi) dynaamiset lisäkuormat koeosuudelta 143. Nopeus 80 km/h.



Kuva 19. PTM-auton, Roadmanin ja VTT:n kuorma-auton vetoakselilta mitattujen dynaamisten lisäkuormien (maksimit) kumulatiiviset jakaumat koeosuudelta 143. Nopeus 80 km/h.

PTM-auto kuten Roadmankin laskevat dynaamisen lisäkuorman tien pituusprofiilista. PTM-auto mittaa profiilin terävämmän muotoisena, josta seuraavat myös suuremmat dynaamiset lisäkuormat varsinkin suurempien epätasaisuuksien kohdalla. Sekä PTM-auton QCS-simulointimallissa että Roadmanin käyttämässä GM Truck Model-mallissa akselipaino on noin 10 % suurempi kuin mittauskuorma-auton vetoakselipaino. Tämä selittää osan tasoerosta pienempien dynaamisten lisäkuormien osalta.

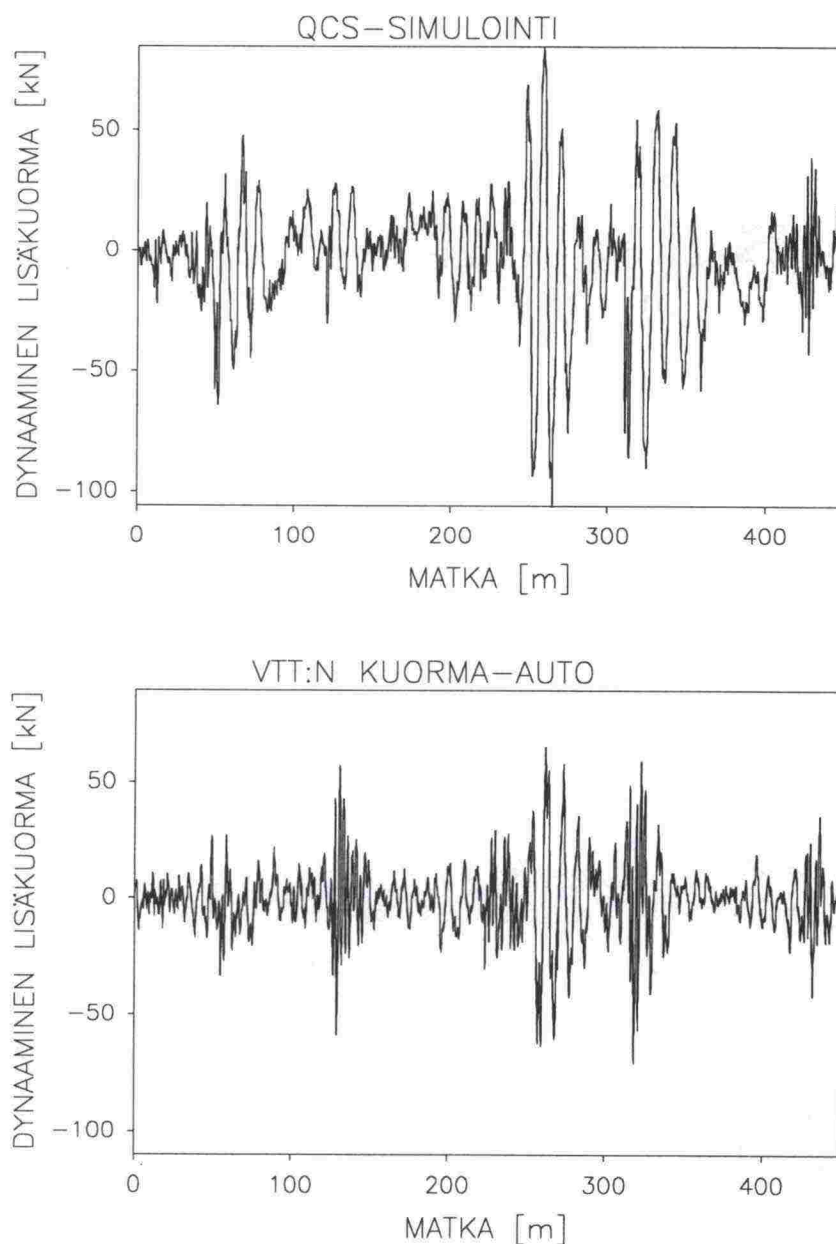
Neljännesautomallilla simuloitu dynaaminen lisäkuorma ja etuakselin mitattu dynaaminen lisäkuorma samalta koeosuudelta 143 on esitetty kuvassa 20. Siitä nähdään, että näinkin yksinkertainen simulointimalli antaa saman suuntaisia tuloksia kuin todellisesta kuorma-autosta tehdyt mittaukset.



Kuva 20. QCS-simulointi (ylempänä) ja VTT:n kuorma-auton etuakselin mitattu dynaaminen lisäkuorma koeosuudelta 143. Nopeus 80 km/h.

Kuvassa 21 on vastaava neljännesautomallilla simulointi ja mitattu dynaaminen lisäkuorma kuorma-auton vetoakselilta. Kuvan simuloinnissa käytetyt parametrit vastaavat hyvin järeällä taka-akselistolla varustettua kuorma-autoa, jonka akselipaino on noin 10 % mittausauton akselipainoa suurempi. Lisäksi mittausautossa on teliakselisto, jonka keinunta näkyy selvästi esim. 110 ja 300 metrin kohdilla. Koska neljännesautomallilla on mahdotonta simuloida

teliakseliston toimintaa, on kuvan 20 signaaleissa selviä eroja. Kuitenkin voidaan edelleen löytää samankaltaisuutta, esim. kohdassa 250 - 300 metriä. Edellä mainittu teliakseliston monimutkainen toiminta pystytään simuloimaan hyvin ADAMS-ohjelmiston simulointimallilla.

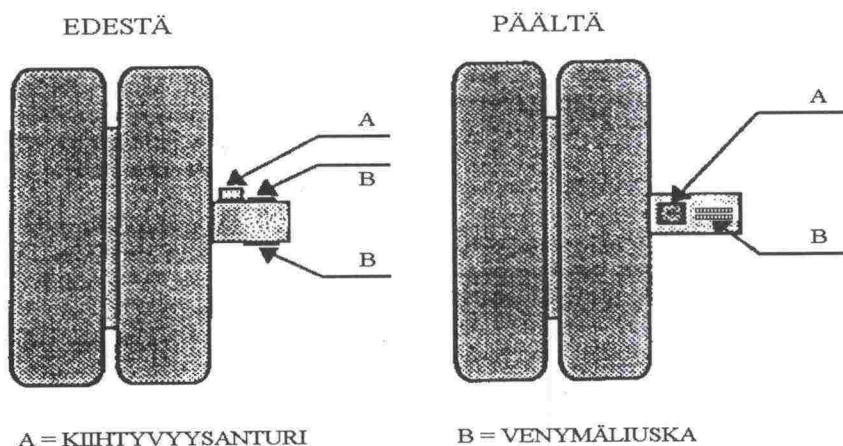


Kuva 21. QCS-simulointi (ylempänä) ja VTT:n kuorma-auton vetoakselin mitattu dynaaminen lisäkuorma koeosuudelta 143. Nopeus 80 km/h.

8 DYNAAMISET AKSELIPAINOT

Dynaamisen rasitusindeksin (DRI) ja dynaamisten akselipainojen toistuvuuden selvittämiseksi tehtiin VTT:n kuorma-autolla dynaamisia akselipainomittauksia. Dynaamisella akselipainolla tarkoitetaan liikkuvan auton akselin hetkellistä tiehen kohdistamaa voimaa, joka vaihtelee tien epätasaisuuden, auton jousituksen, ajonopeuden yms. vaikutuksesta. Tätä dynaamisen ja staattisen akselipainon erotusta kutsutaan tässä yhteydessä dynaamiseksi lisäkuormaksi. Dynaamisten akselipainojen mittaamiseen VTT:llä on käytössä kolmiakselinen, nostotelillä varustettu kuorma-auto (Sisu M-162). Jousituksena on perinteiset lehtijouset etuakselilla sekä telissä, lisäksi etuakselilla on iskunvaimentimet. Mittauksia varten kuorma-auto oli kuormattu mahdollisimman lähelle lain sallimaa maksimipainoa 22000 kg, akselipainojen jakautuessa etuakselille 5600 kg, vetoakselille 9200 kg ja teliakselille 7500 kg. Rengaspaineet olivat vastaavasti 700, 800 ja 700 kPa.

Tavallisin tapa dynaamisen akselipainon mittaamiseksi on mitata kuormituksen aiheuttama akselin taipuma. VTT:n kuorma-autossa akselin taipuma mitataan kuvan 22 mukaisesti asennetuilla venymäliuskoilla. Staattisessa tilanteessa venymäliuskoilla saadaan tarkasti mitattua kuorma-auton akselipaino mutta dynaamisessa tilanteessa eli auton liikkuessa syntyy akselille hitausvoimia. Tätä varten akselille on asennettu kiihtyvyyssanturi (kuva 22), jolla voidaan ottaa huomioon pyörän pystysuuntainen hitausvoima. Mittauksissa näytteenottotaajuutena oli 300 Hz, jolloin dynaaminen akselipaino voitiin todeta noin 8 cm:n välein ajonopeudella 80 km/h.



Kuva 22. Antureiden sijainti kuorma-auton akseleilla dynaamisessa akselipainomittauksessa.

Pyörän tiehen kohdistamien voimien erottelemiseksi suodatettiin signaalia 100 Hz:n analogisella ja 50 Hz:n digitaalisella alipäästösuodattimella. Sen lisäksi tien kaarteisuuden ja tuulikuorman aiheuttamat korin kallistelusta johtuvat erittäin pitkät aallonpituudet poistettiin 2 sekunnin liukuvalla keskiarvolla.

Dynaamiset akselipainomittaukset tehtiin kaikilla tarkoilla 500 m:n koeosuuksilla (53/1, 53/2, 143, 170 ja 1271) ja tarkempi tulosten käsittely keskimmaiselta 100 m:n osuudelta. Mittausnopeuksina oli 80, 60 ja 40 km/h paitsi Nummi-Pusulan koeosuudella (1271), jossa tien mutkaisuuden takia ei mitattu nopeudella 80 km/h. Lisäksi tehtiin kolme toistomittausta suurimmalla mittaussnopeudella. Mittausten yhteydessä tutkittiin alustavasti, kuinka hyvin tiehen asennettu ajoneuvovaaka WIM (Weight-In-Motion) pystyy mittaamaan dynaamisia akselipainoja. Vaa'an tarkkaan paikantamiseen käytettiin valokennoa, jolla vaa'an sijainti voitiin sitoa mittauksiin.

Dynaamisten akselipainomittausten minimi-, maksimi- ja DLC-arvot on esitetty taulukossa 21. DLC (Dynamic Load Coefficient) on dynaamisen akselipainon keskihajonnan ja keskiarvon osamäärä, kun dynaaminen akselipaino on normaalisti jakautunut. Kuvissa 23 ja 24 on laskettuna dynaamisten akselipainojen maksimit ja minimi muutosprosentteina staattisesta akselipainosta eli kuinka paljon akselin hetkellinen kuorma lisääntyy tai vähenee paikallaan olevan auton staattisesta akselipainosta. Niistä voidaan havaita, että tasaisellakin tiellä (koeosuus 53/2) syntyy 20 %:n ja huonolla tiellä (koeosuus 143) jopa 70 %:n hetkellisiä lisäkuormia. Nopeuden nostaminen 40:stä 80:een km/h kasvattaa tietä rasittavia dynaamisia lisäkuormia, koeosuudella 170 jopa kaksinkertaiseksi. Toisaalta myös liikenneturvallisuus vähenee pyörän keventäessä hetkittäisesti voimakkaasti otettaan tiestä. Ilmiö on sitä selvempi mitä huonompikuntoinen tie on, esim. koeosuudella 143 vetoakseli on keventynyt hetkellisesti 70 %. Koeosuuden 170 osalta voidaan lisäksi havaita varsinkin etuakselin voimakas dynaamisen lisäkuorman kasvu nopeuden kasvaessa, mikä aiheutuu korin voimakkaasta nyökinnästä.

Kuvassa 25 on esitetty koeosuuksien 53/2, 53/1, 170 ja 143 dynaamisten lisäkuormien maksimiarvojen vaihteluvälit (nopeudella 80 km/h) prosentteina Dipstickillä mitatun IRI-arvon suhteen. Vetoakselin dynaamiset lisäkuormat korreloivat kohtalaisesti IRI-arvon kanssa (selitysaste $r^2 = 0.77$). Edellä mainitun nyökinnän takia etuakselin dynaamisen lisäkuorman maksimiarvo on suurempi koeosuudella 170 (IRI = 5,01) kuin koeosuudella 143 (IRI = 5,91). Näin ollen myös etuakselin dynaamisen lisäkuorman selitysaste ($r^2 = 0,57$) IRI:n suhteen on pienempi kuin vetoakselilla. Kuvassa 25 on esitetty myös dynaamisesta lisäkuormasta aiheutuva tien rasittuminen (tien rasisuskerroin laskettu neljännen potenssin säännöllä). Kerroin ilmoittaa, kuinka monta

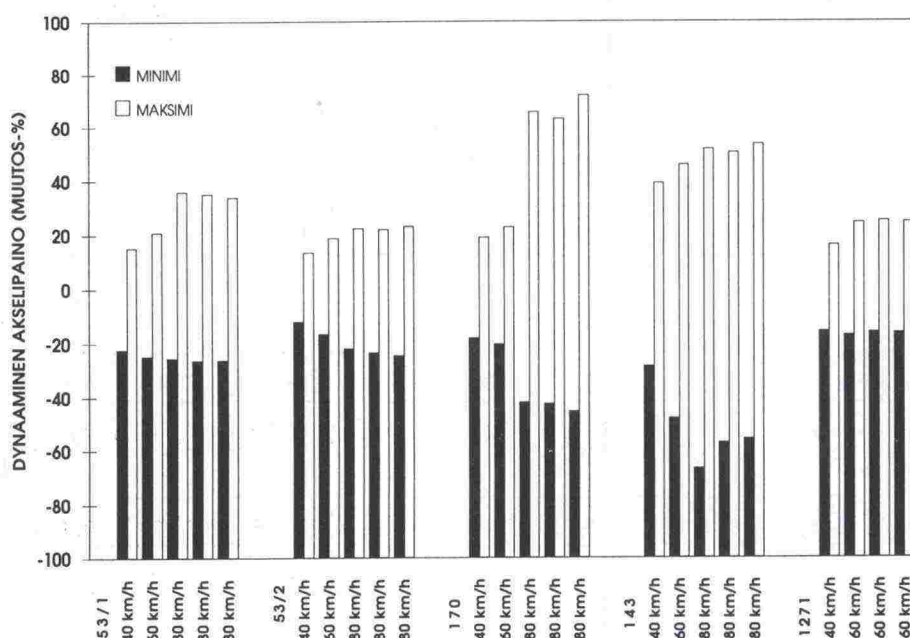
kertaisesti tie rasittuu dynaamisen lisäkuorman vaikutuksesta: Esim. 50:n prosentin dynaaminen lisäkuorma rasittaa tietä viisinkertaisesti.

Telillä varustetussa kuorma-autossa painopiste, minkä ympäri kori pyrkii keinu-
maan, sijaitsee hyvin lähellä vetoakselia ja kaukana etuakselista. Tällöin
nyökintä korostaa juuri etuakselin dynaamisia lisäkuormia. Lisäksi tien
epätasaisuuksien aallonpituuden ja kuorma-auton akselivälin suhde vaikuttaa
korin liiketiloihin, ja sitä kautta tiehen kohdistuviin dynaamisiin lisärasituksiin.
Ko. suhteen ollessa = 1, kori ei nyöki, vaan tekee puhdasta ylös/alas liikettä.
Ilmiö tunnetaan akselivälin suodattumisena (Wheelbase filtering).

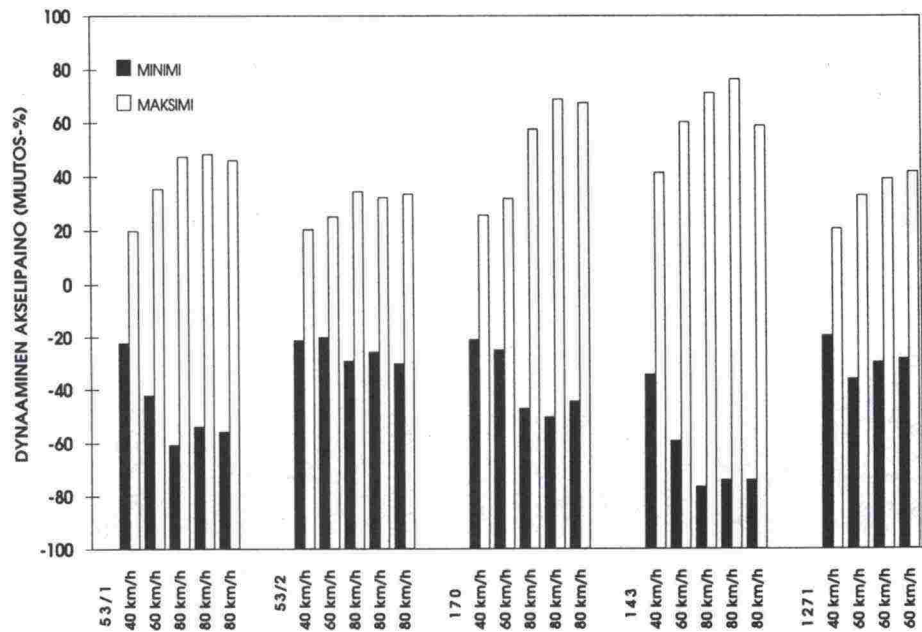
Taulukko 21. Dynaamisten akselipainomittausten minimi-, maksimi- ja DLC-arvot sekä keskihajonnat etu- ja vetoakselilta. Staattinen etuakselipaino 56 kN ja vetoakselipaino 92 kN.

	Etuakseli				Taka-akseli			
Tie Nopeus	Min. (kN)	Max. (kN)	Keski- Haj.(kN)	DLC	Min. (kN)	Max. (kN)	Keski- Haj.-	DLC
53/1								
40 km/h	43,5	64,5	2,06	0,037	71,5	110,2	5,91	0,064
60 km/h	42,1	67,7	3,20	0,057	53,1	124,7	6,60	0,072
80 km/h	41,7	76,1	4,78	0,085	36,0	135,4	7,55	0,082
80 km/h	41,3	75,7	4,81	0,086	42,4	136,3	7,73	0,084
80 km/h	41,4	75,0	4,72	0,084	40,5	134,3	7,75	0,084
53/2								
40 km/h	49,2	63,5	1,62	0,029	72,4	110,7	6,77	0,074
60 km/h	46,7	66,5	2,68	0,048	73,4	115,1	5,76	0,063
80 km/h	43,6	68,4	3,53	0,063	65,0	123,7	6,13	0,067
80 km/h	42,8	68,3	3,72	0,066	68,2	121,7	6,43	0,070
80 km/h	42,2	68,9	3,69	0,066	64,0	122,9	6,44	0,070
170								
40 km/h	45,8	66,6	2,55	0,045	72,6	115,6	5,03	0,055
60 km/h	44,5	68,8	3,57	0,064	68,9	121,3	5,72	0,062
80 km/h	32,5	92,8	6,34	0,113	48,5	145,0	8,55	0,093
80 km/h	32,2	91,3	6,29	0,112	45,5	155,5	8,79	0,096
80 km/h	30,6	96,3	6,72	0,120	51,0	154,2	9,27	0,101
143								
40 km/h	40,0	77,9	3,61	0,064	60,1	130,0	6,93	0,075
60 km/h	29,1	81,6	6,22	0,111	37,4	147,5	10,98	0,119
80 km/h	18,6	84,9	7,64	0,136	21,5	157,6	14,58	0,159
80 km/h	24,0	84,2	7,42	0,132	23,7	162,4	14,17	0,154
80 km/h	24,8	86,0	7,52	0,134	23,7	146,3	13,14	0,143
1271								
40 km/h	47,2	65,0	2,62	0,047	73,8	111,0	5,63	0,061
60 km/h	46,3	69,7	3,53	0,063	58,6	122,3	6,52	0,071
60 km/h	46,9	70,0	3,40	0,061	64,5	127,9	6,04	0,066
60 km/h	46,8	69,9	3,53	0,063	65,5	130,3	6,29	0,068

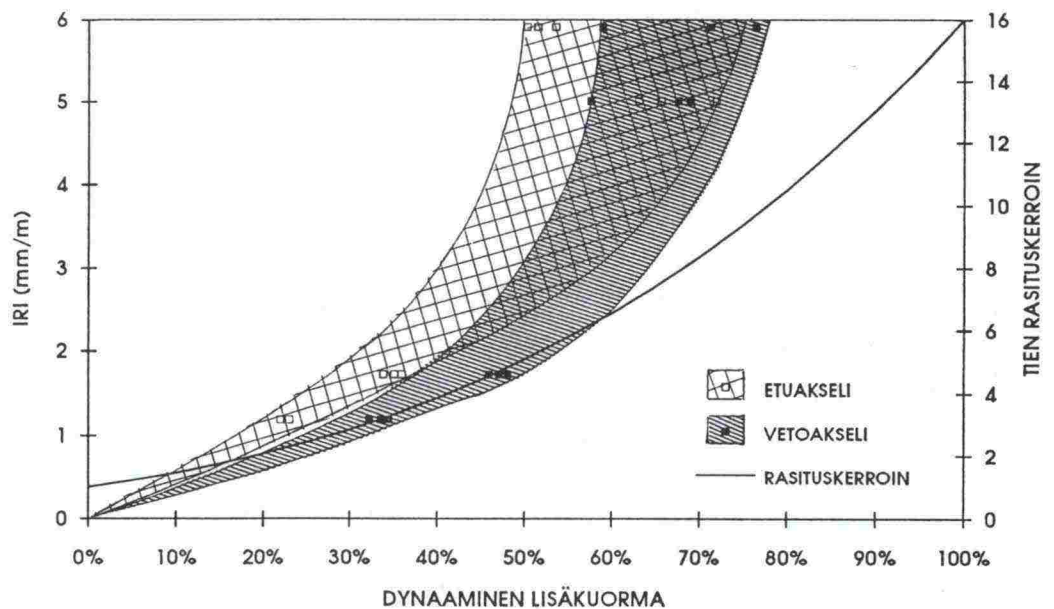
DLC-arvot vaihtelevat välillä 0,04 - 0,14 (etuakseli) ja 0,06 - 0,16 (vetoakseli). Arvot ovat siihen nähden, mitä kansainvälisesti esitetään, pienehköjä /21/. Tämän selittää se, että useat ulkomailla käytetyt teliakselistot esim. "Walking beam" ovat dynaamisia lisäkuormia ajatellen epäedullisempia kuin Suomessa yleinen nostoteli. Kansainvälisesti DLC-arvot 0,1 - 0,3 ovat tyypillisiä. Esimerkiksi DLC-arvolla 0,2 löytyy maksimissaan 60 %:n lisäkuormia. Tällöin dynaaminen lisäkuorma vaihtelee välillä ± 20 % ja noin joka 20:s piikki (peak) saavuttaa 40 %:n lisäkuormaa merkitsevän arvon.



Kuva 23. Etuakselin dynaamisten akselipainojen maksimit ja minimi muutosprosentteina staattisesta akselipainosta 56 kN.

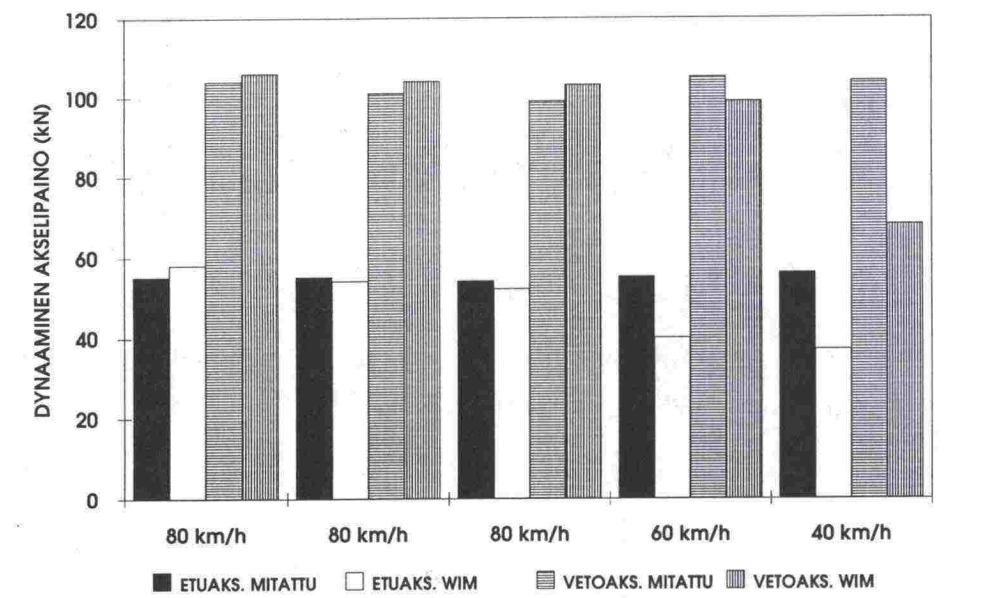


Kuva 24. Vetoakselin dynaamisten akselipainojen maksimit ja minimi muutosprosentteina staattisesta akselipainosta 92 kN.



Kuva 25. Dynaamisten lisäkuormien (%) maksimiarvojen vaihteluväli Dipstickillä mitatun IRI:n suhteen (rasteroidut alueet). Dynaamisten lisäkuormien aiheuttama tien rasittuminen (tien rasituskerroin, oikea pystyasteikko).

Mitattaessa koeosuudella 53/1 dynaamisia akselipainoja, rekisteröitiin saman aikaisesti myös vaa'an (WIM) antamat lukemat. Yhtäaikainen tulosten rekisteröinti varmistettiin NMT-yhteydellä vaakaa valvovaan henkilöön. Sekä kuorma-autosta mitatut dynaamiset akselipainot että WIM:n antamat lukemat on esitetty taulukossa 22 ja kuvassa 26. Voidaan havaita, että WIM mittaa hyvin kuorma-auton dynaamiset akselipainot normaalilla ajonopeudella 80 km/h. Sen sijaan nopeuden pudottaminen alentaa selvästi WIM:n rekisteröimiä dynaamisia akselipainoja.

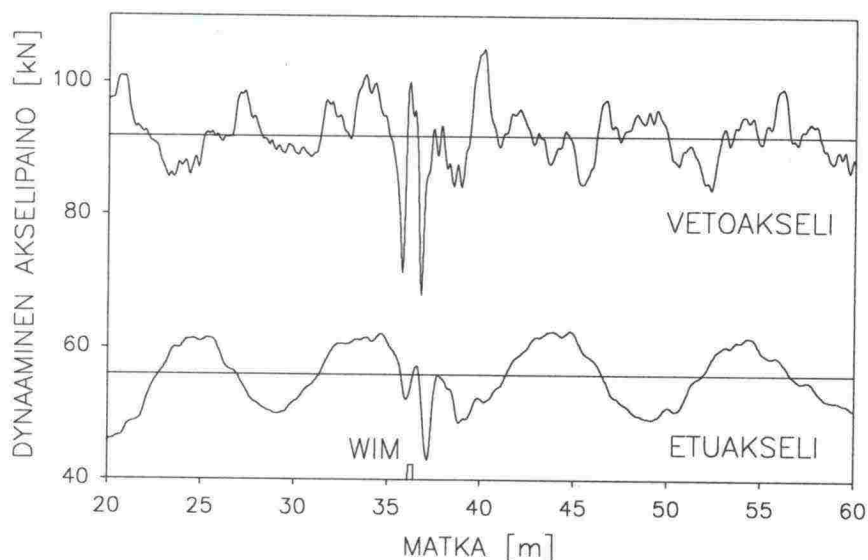


Kuva 26. Dynaaminen akselipaino mitattuna samanaikaisesti kuorma-autosta ja WIM:stä. Staattinen etuakselipaino 56 kN ja vetoakselipaino 92 kN.

Taulukko 22. Dynaaminen akselipaino mitattuna samanaikaisesti kuorma-autosta ja ajoneuvovaa'asta (WIM). Staattinen etuakselipaino 56 kN ja vetoakselipaino 92 kN.

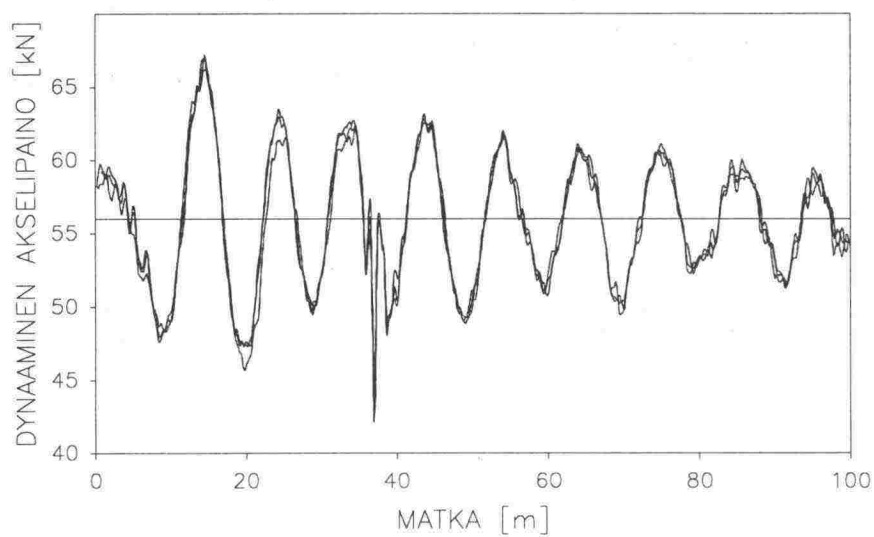
	Etuakseli		Vetoakseli	
Nopeus (km/h)	Mitattu (kN)	WIM (kN)	Mitattu (kN)	WIM (kN)
80	55	58	104	106
80	55	54	101	104
80	54	52	99	103
60	55	40	105	99
40	56	37	104	68

Kuvan 27 perusteella havaitaan kuorma-autosta mitatuissa signaaleissa selvät dynaamista akselipainoa keventävät piikit WIM:n (sijainti noin 36 m) molemmin puolin. On mahdollista, että vaa'an lukema rekisteröityy hitaammissa nopeuksissa näistä piikeistä.



Kuva 27. Etu- ja vetoakselin dynaamiset akselipainot koeosuudella 53/1 (WIM noin 36 metrin kohdalla). Nopeus 80 km/h.

Dynaamisten akselipainojen toistuvuuden selvittämiseksi mittauksissa tehtiin kolme toistomittausta nopeudella 80 km/h. Kuvassa 28. on esimerkki samalla nopeudella 80 km/h mitatuista dynaamisista lisäkuormista etuakselilla. Dynaaminen akselipaino toistuu lähes täydellisesti ajatettaessa samalla nopeudella samaa tieprofiilia. Vetoakselilta saadut tulokset osoittavat saman ilmiön. Nopeuteen 80 km/h verrattuna nopeuksilla 40 ja 60 km/h dynaaminen akselipaino ei toistunut täysin saman vaiheisesti, vaan akselit pyrkivät toimimaan ominaistajaajutensa mukaisesti. Kuitenkin jo WIM:n (kohta 36 m kuvassa 27) kaltainen epätasaisuus pakotti akselit toimimaan samaan tahtiin. Myös VTT:n aikaisemmissa tutkimuksissa tietokonesimulointia (ADAMS) hyväksi käyttäen on päädytty vastaaviin havaintoihin /19 - 20/.



Kuva 28. Etuakselin dynaamisten akselipainojen toistuvuus koeosuudella 53/1.
Kolme toistoa nopeudella 80 km/h.

9 MUITA TUTKIMUKSIA

9.1 Tielaitoksen PTM-autojen vertailumittaukset

Tielaitos on tehnyt kolmena keväänä 1990 - 1992 vertailumittauksia eri PTM-autojen välillä. Näiden mittausten tarkoituksena on ollut varmistaa ennen mittauskauden alkua, että laitteiden kesken ei ole eroja eli että yhteenkään mittariin ei ole tullut vikoja tai muita tarkkuuteen vaikuttavia ongelmia. Vertailussa on ollut aina mukana kaikki PTM-autot, vuonna 1990 4 kpl ja myöhemmin 5 kpl. Tutkimuksessa selvitettiin laitteiden välisiä eroja ja saman auton mittausten toistettavuutta tasaisuus- (IRI) ja uramittausten osalta. Vuoden 1992 mittausten yhteydessä tehtiin myös suppeita vertailuja IRI-auton ja Roadmanin osalta /5,6,7/.

Vertailumittauksissa ajettiin kaikilla autoilla sama testilenkki (noin 100 km) kahteen kertaan kunakin vuonna. Taulukoissa 23, 24 ja 25 on esitetty IRI-, IRI4-arvojen sekä poikkeamaindeksien tulokset kullakin autolla eri vuosina. Taulukossa 26 on esitetty tasaisuusmittausten toistettavuus eri autoilla 1990 - 1992. Vuonna 1992 vertailumittauksissa oli mukana myös VTT:n IRI-auto. IRI-autolla mitattu IRI-arvo oli 1,19 mm/m, IRI4-arvo 0,58 mm/m ja poikkeamaindeksi 0,26 mm. IRI-autolla saatiin siis hieman alhaisempia arvoja kuin PTM-autoilla, joiden keskiarvotulokset olivat IRI: 1,31 mm/m ja IRI4: 0,64 mm/m. Ero oli noin 9 %. IRI-auton mittausten toistettavuus oli samaa luokkaa kuin PTM-autoillakin eli korrelaatio oli yli 0,9 /5,6,7/.

Taulukko 23. Tielaitoksen PTM-autojen vertailumittausten IRI-tulokset (mm/m) 1990 - 1992 /5,6,7/.

Vuosi	VTT	Turku	Häme	Kainuu	K-Pohj.m.
1990	1,37	1,41	1,41	1,35	-
1991	1,62	1,68	1,70	1,72	1,61
1992	1,31	1,32	1,34	1,30	1,29

Taulukko 24. Tielaitoksen PTM-autojen vertailumittausten IRI4-tulokset (mm/m) 1990 - 1992 /5,6,7/.

Vuosi	VTT	Turku	Häme	Kainuu	K-Po- hj.m.
1990	0,73	0,71	0,70	0,72	-
1991	0,97	0,94	0,92	0,99	0,94
1992	0,66	0,62	0,61	0,66	0,66

Taulukko 25. Tielaitoksen PTM-autojen vertailumittausten poikkeamaindeksitu-lokset (mm) 1990 - 1992 /5,6,7/.

Vuosi	VTT	Turku	Häme	Kainuu	K-Po- hj.m.
1990	0,38	0,34	0,42	0,33	-
1991	0,92	0,71	0,80	0,85	0,71
1992	0,33	0,35	0,27	0,41	0,32

Taulukko 26. Tielaitoksen PTM-autojen vertailumittausten mukainen tasaisuusmittausten toistettavuus (korrelaatio) 1990 - 1992 /5,6,7/.

Vuosi	VTT	Turku	Häme	Kainuu	K-Po- hj.m.
1990	0,94	0,97	0,99	0,68	-
1991	0,85	0,94	0,98	0,95	0,94
1992	0,97	0,96	0,97	0,97	0,96

Viimeisten kolmen vuoden aikana järjestetyt palvelutasomittareiden vertailut osoittavat selvästi, että asianmukaisesti kalibroituina ja käytettyinä kaikki palvelutasoautot ovat keskenään vertailukelpoisia ja mittaavat samalla tasolla. Erot eri autojen tulosten välillä IRI:n ja IRI4:n osalla olivat muutaman prosentin luokkaa. Poikkeamaindeksin osalla oli muihin arvoihin verrattuna hieman suurempaa hajontaa. Erot eri vuosina johtuvat eri ajoreiteistä. Todennäköisin syy eroihin on hieman eri ajolinja mitattaessa. /5,6,7/.

Tasaisuusmittausten toistettavuus on kaikilla palvelutasomittareilla ollut joka vuosi erittäin korkea. Peräkkäisten samoilla osuuksilla tapahtuneiden mittausten korrelaatiot (taulukko 26) ovat olleet erittäin korkeita (lukuunottamatta Kainuun autoa vuonna 1990) /5,6,7/.

Tielaitos on tehnyt suppean selvityksen myös Roadmanin mittausten toistettavuudesta sekä tulosten vertailtavuudesta PTM-auton kanssa vuonna 1992. Toistettavuusmittaukset tehtiin sorateillä. Korrelaatio eri toistomittausten välillä oli 0,9. Mittauskertoja oli kaksi. Selvityksen mukaan Roadman korreloi verrattain hyvin myös PTM:n kanssa, mutta antaa säännöllisesti hieman korkeampia IRI-arvoja /7/.

Yhden PTM-auton ja ruotsalaisen Laser-RST-auton välillä tehtiin myös pieni vertailu vuosina 1989 ja 1990. Sen mukaan LRST antaa lähes 20 % pienempiä IRI-arvoja kuin PTM-auto /5/.

9.2 Tanskalainen tasaisuusmittareiden vertailu

Tässä vuonna 1989 tehdyssä tutkimuksessa verrattiin keskenään kolmea IRI-arvon tuottavaa tasaisuusmittaria. Kaksi tutkimuksessa mukana olleista laitteista, ruotsalainen Laser Road Surface Tester (LRST) ja tanskalainen DK-Profilograph perustuvat samanlaiseen profiilinmittaustekniikkaan kuin VTT:n PTM-auto (laser ja kiihtyvyyssanturi). Kolmas mittari, norjalainen JULY, perustuu ultraäänen avulla tapahtuvaan etäisyyden mittaukseen. Ultraäänianturit (17 kpl) on asennettu 4 metriä pitkälle pituussuuntaiselle palkille 250 mm:n välein. Kun mitattaessa lukemia otetaan 250 mm:n välein, voidaan näin saatujen etäisyyslukemien perusteella määrittää pituusprofiili samaan tapaan kuin Dipstickillä /4/.

Tutkimuksessa verrattiin eri laitteiden välistä korrelaatiota tasaisuuden mittauksessa (IRI-arvo) sekä eri laitteiden mittausten toistettavuutta. Kaikilla laitteilla IRI-arvon keskihajonta toistomittauksissa vaihtelee suuresti eri koeosuuksilla. Osittain tämä johtuu laitteiden epätarkkuudesta, osittain ajolinjojen vaihtelusta. Mittausaineistoa oli 4200 m. Pienin hajonta oli DK-Profilografilla. RST:n hajonta oli 33 % suurempi ja JULY:n 400 % suurempi. Selitysasteet kahden toistomittauksen välillä olivat kaikilla laitteilla kuitenkin hyvät: DK $r^2 = 0,972$, RST $r^2 = 0,982$ ja JULY $r^2 = 0,856$ /4/.

Myös eri laitteiden väliset selitysasteet olivat sangen korkeita. RST:n ja DK:n välinen selitysaste oli $r^2 = 0,960$, RST:n ja JULY:n välillä $r^2 = 0,897$ sekä DK:n ja JULY:n välillä samoin $r^2 = 0,897$ /4/.

Laitteet mittasivat kaikki hieman eri tasolla. Alhaisin IRI-arvo saatiin RTS:llä (1,68 mm/m) sen jälkeen DK-Profilographilla (1,92 mm/m, ero 14 %) ja korkein arvo oli JULY:lla (2,24 mm/m, ero 33 %). Nämä tasoerot olivat suurempia kuin PTM-auton ja Roadmanin välinen tasoero.

9.3 Tasaisuusmittareiden vertailu SHRP:ssa

Amerikkalaisen tutkimusprojektin SHRP:in (Strategic Highway Research Program) yhteydessä tutkittiin myös eräitä tasaisuuden mittauslaitteita vuonna 1992. Tässä tutkimuksessa olivat mukana mm. LRST ja DK-Profilograph, joiden mittaamaa pituusprofiilia verrattiin Dipstickillä mitattuun profiiliin /18/.

Kaikilla kolmella mittalaitteella profiilit olivat samansuuntaiset. LRST ja DK-profilograph tulostavat profiilin noin 5 cm:n välein ja Dipstick 30 cm:n välein, joten LRST:n ja DK-Profilographin profiilit olivat terävämpiirteisiä. Pieniä eroja oli myös profiileissa näkyvissä epätasaisuuksissa /18/.

IRI-arvot olivat kummallakin laitteella lähellä Dipstick-profiilista laskettuja IRI-arvoja. LRST erosi Dipstick-arvoista noin 5 % ja DK-Profilograph noin 8,5 %. Kummallakin laitteella saatiin välillä suurempia ja välillä pienempiä arvoja kuin dipstickillä. Suomessa tielaitoksen vuonna 1990 tekemässä tutkimuksessa LRST:llä saatiin kuitenkin PTM-autoa alhaisempia tuloksia. Tässä on selvä epä johdonmukaisuus, koska PTM-autolla saadaan säännöllisesti Dipstickiä pienempiä arvoja. Tutkimuksessa testattiin myös kuusi muuta tasaisuuden mittauslaitetta. Näiden erot Dipstickiin vaihtelivat välillä 5 - 18 % /18/.

9.4 Saksalainen tasaisuusmittareiden vertailu

Saksalaisten vuonna 1992 tekemässä tutkimuksessa vertailtiin keskenään seuraavia tasaisuusmittareita: HRM (High-speed Road Monitor, Iso-Britannia), LRST (Laser Road Surface Tester, Ruotsi), ARAN (Automatic Road Analyzer, Kanada) ja ARGUS (Automatic Roadcondition Graduating Unit System) /9/. Tutkimuksessa keskityttiin vertailemaan pääasiassa laitteiden uramittausta. Pituussuuntaisen tasaisuuden osalta vertailtiin ainoastaan profiileja. IRI-arvojen vertailuja ei tehty. Kaikilla laitteilla saatiin saman muotoinen profiili. Yksittäisten epätasaisuuksien kohdalla oli kuitenkin eri laitteiden välillä eroja samalla tavalla kuin PTM:n ja Roadmaninkin osalla /9/.

10 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSIA

Molemmat testatut mittalaitteet näyttävät soveltuvan hyvin päällysteen pituussuuntaisen tasaisuuden mittaamiseen. Kummallakin laitteella IRI-mittausten toistettavuus on hyvä. VTT:n palvelutasomittarilla (PTM) toistomittausten hajonta oli hieman AL-Engineering Oy:n kehittämän Roadmanin hajontaa pienempi. Roadmanilla mitatut IRI-arvot olivat PTM:llä mitattuja keskimäärin 14 % suuremmat. Dipstickillä mitatuista profiileista määritettyihin IRI-arvoihin verrattuna PTM:n IRI-tulokset olivat keskimäärin noin 15 % alhaisempia. Alhaisilla IRI-arvoilla Roadmanin tulokset olivat Dipstickin tuloksia pienemmät, mutta korkeilla (yli 4 mm/m) arvoilla suuremmat. IRI-mittauksia tehtiin myös VTT:n IRI-autolla. Näiden mittausten mukaan PTM ja IRI-auto mittaavat samalla tasolla IRI- ja IRI4-arvoa. Poikkemaindeksin osalla oli hieman eroja. Sekä PTM:n, IRI-auton että Roadmanin toistettavuus oli niin hyvä, että normaalitapauksissa kunnon ja laadun inventointimittauksissa toistoja ei tarvita.

Mittaussnopeudella näyttää olevan pieni vaikutus IRI-arvoihin sillä mm. eri nopeuksilla ajettaessa ajolinja saattaa hieman vaihdella. Tästä syystä olisi syytä pyrkiä käyttämään aina mitattaessa samaa nopeutta. Sopiva mittaussnopeus on 60 - 80 km/h.

IRI-tuloksia varten määritettiin lineaariset mallit eri laitteiden (PTM, Roadman, Dipstick) välille. Näiden mallien avulla voidaan eri mittalaitteiden tulokset muuttaa yhteismitallisiksi. Mallit eivät välttämättä ole kovin tarkkoja, koska vertailuaineisto niiden muodostamista varten oli vielä verrattain suppea. Esimerkiksi oheisen mallin mukaan Roadmanin mittaustulokset voidaan muuttaa vastaamaan PTM-auton tuloksia: $Y = 0,963 \cdot X + 0,063$ (peruskoeosuuksien tulosten perusteella määritetty malli). Näiden määritettyjen mallien avulla saatiin eri laitteiden tulokset vastaamaan paremmin toisiaan, mutta aivan samoiksi ne eivät muuttuneet. Mallien tarkentamista varten tarvittaisiin vielä lisää mitattua vertailuaineistoa. Nämä mallit eivät ole kovin tarkkoja, koska kalibrointiaineisto oli verrattain suppea. Jos aineisto olisi laajempi, päästäisiin luultavasti käyräviivaisilla kalibroinneilla lineaarista tarkempiin tuloksiin. Peruskoeosuuksien tulosten perusteella määritetyt mallit ovat suuremman aineiston johdosta luotettavampia kuin tarkkojen koeosuuksien avulla määritetyt.

Sekä PTM-autolla että Roadmanilla profiilimittausten toistettavuus oli erittäin hyvä. Verrattaessa näiden laitteiden ja Dipstickin profiileja keskenään, oli niiden välillä pieniä eroavaisuuksia. Dipstickin profiili oli kaikkein teräväpiirteisin ja Roadmanin profiili pehmein (vähiten aivan lyhytaaltoista epätasaisuutta). Mitään merkittäviä eroja profiilien aallonpituusjakautumien välillä ei ollut.

Sekä PTM-auto ja IRI-auto että Roadman soveltuvat hyvin tien tasaisuuden mittaamiseen. Niiden mittaustulosten toistettavuus on hyvä myös muualla maailmassa tehtyihin vastaavanlaisiin laitteisiin verrattuna. Myöskään erot Dipstickillä määritettyihin IRI-arvoihin eivät ole sen suurempia kuin vastaavilla ulkomaalaisilla laitteilla. PTM-auton tulokset eroavat Dipstickin tuloksista hieman johdonmukaisemmin kuin Roadmanin.

Mitattaessa tien tasaisuutta auton taka-akselilta on otettava huomioon, että eri autoilla (erilaiset kokonais- ja akselipainot, erilaiset akselistoratkaisut jne.) saadaan toisistaan poikkeavia mittaustuloksia varsinkin akselin keskeltä mitattaessa. Oikealla suodatuksella (auton rakenteista syntyvät taajuuskomponentit pois) auton taka-akselin pystykiihtyvyyksiä voidaan käyttää tien tasaisuuden arvioimiseen. Anturin sijoittaminen lähelle pyörää on suositeltavaa.

Roadman-mittauksessa auton renkaan tasapainotuksella on vaikutusta saatavaan IRI-tulokseen. Vaikutuksen suuruutta testattiin mittaamalla tasaisuutta paikallaan pyörivällä sylinterillä Teknillisen korkeakoulun autotekniikan laboratoriossa. Tällöin IRI-arvon pitäisi olla teoriassa 0. Laite näytti tasapainotetulla renkaalla koko ajan arvoa noin 0,1 mm/m. Ajettaessa alle 60 km/h tai yli 100 km/h oli arvo tätäkin suurempi. Erittäin epätasapainotetulla renkaalla IRI-arvo oli noin 0,4 mm/m. On syytä tarkistaa säännöllisesti, että mittaukseen käytettävä auto on teknisesti moitteettomassa kunnossa.

Pyrittäessä määrittämään tien palvelutasoa soveltuu profiilinmääritykseen perustuva tasaisuuden mittaamenetelmä (kuten PTM ja Roadman) paremmin kuin pelkkään kiihtyvyyden mittaamiseen perustuva. Etenkin mitattaessa kiihtyvyyksiä vain auton akselilta vaikuttaa auton rakenne selvästi tuloksiin eikä akselin kiihtyvyydestä voida vetää suoraviivaista yhteyttä korin kiihtyvyyteen. Kun määritetään tien pituusprofiili, voidaan siitä laskea erilaisia tasaisuutta kuvaavia tunnuslukuja, jotka ovat myös kansainvälisesti vertailtavissa (esim. IRI-arvo).

Mikäli yksittäisten epätasaisuuksien paikantaminen on tärkeätä, on mittauksen aloituspiste saatava mahdollisimman tarkasti paikalleen (esim. tieosan vaihdoskohta). Tämä onnistuuakin käytännössä 3 - 10 metrin tarkkuudella. Tällöin sekä PTM:llä että Roadmanilla löytyvät yksittäisten heittojen paikat 10 metrin tarkkuudella.

Sekä PTM-auton että Roadmanin käyttämä neljännesautosimulointi antaa samansuuntaisia dynaamisia lisäkuormia, kuin mitä saadaan kuorma-autosta mitattuna. Neljännesautomallin toiminta erilaisen aallonpituusjakautuman omaavilla teillä vaatii lisää tutkimista.

Kuorma-autosta mitatut dynaamiset lisäkuormat vaihtelivat tasaisen koeosuuden 20 %:sta epätasaisen tien 70 %:iin ajonopeudella 80 km/h. Nopeuden vähentäminen 80:stä 40:een km/h pienentää dynaamisia lisäkuormia 30 - 50 %.

Mittausten yhteydessä tutkittiin alustavasti, kuinka hyvin tiehen asennettu ajoneuvovaaka WIM (Weight-In Motion) pystyy mittaamaan dynaamisia akselipainoja. Tarkastelussa mukana olleella pienellä aineistolla nopeudella 80 km/h WIM:n antamat dynaamiset akselipainot olivat lähes yhteneviä instrumentoidulla kuorma-autolla mitattujen dynaamisten akselipainojen kanssa. Pienemmillä nopeuksilla WIM antaa selvästi liian pieniä lukemia (nopeudella 40 km/h noin -30 %).

Dynaaminen akselipaino toistuu lähes täydellisesti ajettaessa samalla kuorma-autolla samaa tieprofiilia samalla nopeudella. Nopeuden muutos vähentää dynaamisen akselipainon toistuvuutta, sillä akselit pyrkivät toimimaan ominaistaajuutensa mukaisesti. Pienet terävät epätasaisuudet (esim. tutkimuksessa mukana ollut WIM) pakottavat akselin värähtelyn samaan vaiheeseen.

11 KIRJALLISUUSLUETTELO

1. Instruction Manual for the Auto - Read Metric Profiler Dipstick. The Face Companies. February 1989.
2. Matilainen, Erkki. Henkilöauton taka-akselin pystysuorat kiihtyvyydet Suomen valtateillä. Väitöskirja. Teknillinen korkeakoulu, Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto, Tietekniikka. Otaniemi A 42/1992.
3. Sayers, M., Gillespie, T. Paterson, W. Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements. World Bank Technical Paper Number 46. Washington D.C., USA 1986.
4. Ertman Larsen, H.J. Comparative Measurements with Bump Integrator, DK-Profilometer, JULY and Laser RST. Danish Road Institute. Note 228, 1991.
5. Palvelutasomittareiden vertailumittaukset 1990. Tielaitoksen selvityksiä 8/1991. Tiehallitus, Helsinki 1991.
6. Palvelutasomittareiden vertailumittaukset 1991. Tielaitoksen selvityksiä 38/1991. Tiehallitus, Helsinki 1991.
7. Palvelutasomittareiden vertailumittaukset 1992. Tiehallitus 1992. Julkaisematon.
8. Roadman-mittarin testaus 1992. Tiehallitus, Helsinki 1992. Julkaisematon.
9. Burger, Wolfgang. Zustandserfassung und Auswertung. Strasse und Verkehr. Nr 1, Januar 1993.
10. Paterson, W. Road Deterioration and Maintenance Effect. Models of Planning and Management. World Bank, the Highway and Maintenance Standards Series, The John Hopkins University Press Baltimore and London.
11. Pellinen, Terhi ja Alanko, Timo. Laser- ja IRI-tasaisuusmittausten kalibrointi. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio. Tutkimusraportti 38. Espoo 1991.

12. Seise, Antti ja Alanko, Timo. PTM-autojen kalibrointiaineistojen tilastollinen käsittely. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio. Tutkimusraportti 73. Espoo 1992.
13. Pellinen, Terhi. Uusien päällysteiden tasaisuus 1991. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio. Tutkimusraportti 76. Espoo 1992.
14. Laitinen, Vesa. Rakennettujen ja perusparannettujen teiden tasaisuus 1991 - 1992. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio. Tutkimusraportti 123. Espoo, marraskuu 1992.
15. Laitinen, Vesa, Orama, Reijo ja Pellinen, Terhi. PTM-auton tuottamien tunnuslukujen käyttökelpoisuus ja vertailtavuus sekä niiden yhteys laser-mittauksiin (IRI, IRI4, PI / LASER). Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio. Tutkimusraportti 136. Espoo 1993.
16. Laitinen, Vesa. PTM-auton mittaaman makrokarkeuden soveltuvuus päällysteen lajittuneisuuden mittaamiseen. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio. Tutkimusraportti 148. Espoo, marraskuu 1992.
17. Sayers, M.W., Gillespie, T.D. and Queiroz, C.A.V. The International Road Roughness Experiment: Establishing Correlation and a Standard for Measurement, World Bank Technical Report No. 45, Washington D.C. 1986.
18. Pavement Profiling Equipment Demonstration Comparison Analysis. Federal Highway Administration Long Term Pavement Performance. New York, November 1992. Draft, julkaisematon.
19. Huhtala, M., Halonen, P. & Pihlajamäki, J., Spatial Distribution of Dynamic Loadings on Pavements. Preprint 931062. TRB Annual Meeting 1993. Washington D.C.
20. Huhtala, M., Pihlajamäki, J. & Halonen, P., WIM and dynamic loading of pavements. Heavy vehicles and roads. Proceedings of the third international symposium on heavy vehicle weights and dimensions. Cambridge, UK June 28 - July 2, 1992.

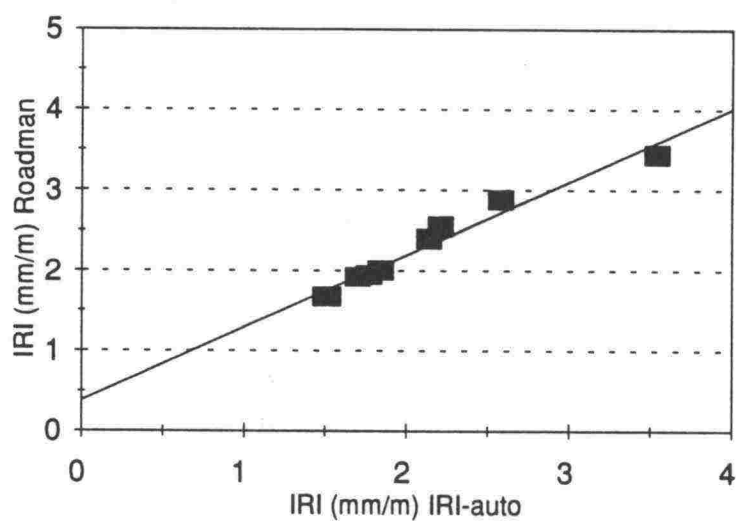
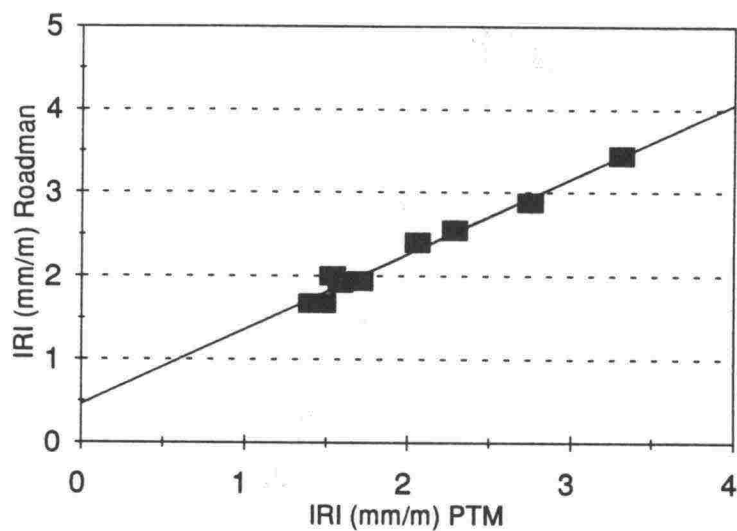
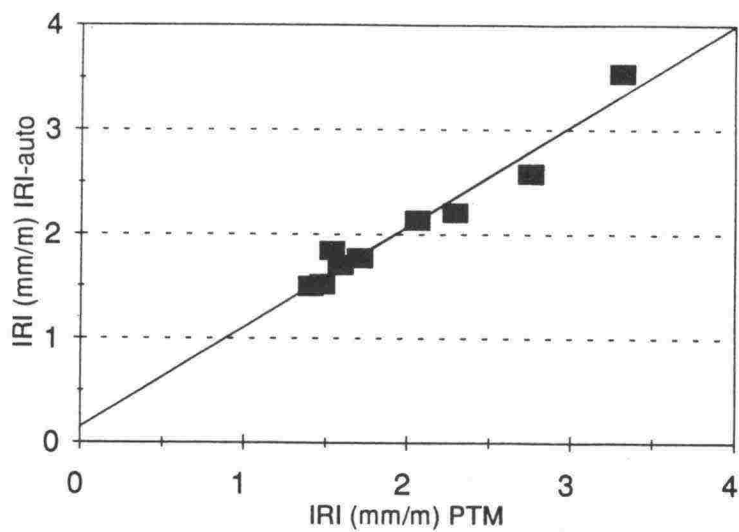
21. Dynamic loading of pavements. Organisation for Economic Co-operation and Development OECD. Paris 1992.
22. Pong, Meau-Fuh and Wambold, James C. Evaluation of Accelerometer-established Inertial Profiling Reference Computation Methods. 71st Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, DC. January 1992.

12 LIITELUETTELO

- 1.1 Regressiot PTM:n, IRI-auton ja Roadmanin välillä peruskoeosuuksilla.
- 1.2 Regressio PTM:n ja Roadmanin välillä peruskoeosuuksilla.
- 1.3 Regressiot PTM:n, Roadmanin ja Dipstickin välillä 100 metrin koeosuuksilla.
- 2.1 Mitatut pituusprofiilit sadan metrin matkalla PTM:llä, Roadmanilla ja Dipstickillä koekohteella mt 53/1.
- 2.2 Mitatut pituusprofiilit sadan metrin matkalla PTM:llä, Roadmanilla ja Dipstickillä koekohteella mt 143.
- 2.3 Mitatut pituusprofiilit sadan metrin matkalla PTM:llä, Roadmanilla ja Dipstickillä koekohteella mt 170.
- 2.4 Mitatut pituusprofiilit sadan metrin matkalla PTM:llä kolmena toistomittauksena koekohteella 170.
- 2.5 Mitatut pituusprofiilit sadan metrin matkalla Roadmanilla kolmena toistomittauksena koekohteella 170.
- 3.1 Epätasaisuuden taajuusjakautumat PTM:llä, Roadmanilla ja Dipstickillä koekohteella 53/2.
- 3.2 Epätasaisuuden taajuusjakautumat PTM:llä, Roadmanilla ja Dipstickillä koekohteella 143.
- 3.3 Epätasaisuuden taajuusjakautumat PTM:llä, Roadmanilla ja Dipstickillä koekohteella 170.
- 4.1 Takavetoisen auton pystykiehtyvyyksien maksimiarvot taka-akselin oikealta ja vasemmalta pyörältä, akselin keskeltä ja taka-akselin päältä keskeltä koria, tie 53/2.
- 4.2 Etuvetoisen auton pystykiehtyvyyksien maksimiarvot taka-akselin oikealta ja vasemmalta pyörältä, akselin keskeltä ja taka-akselin päältä keskeltä koria, tie 53/2.

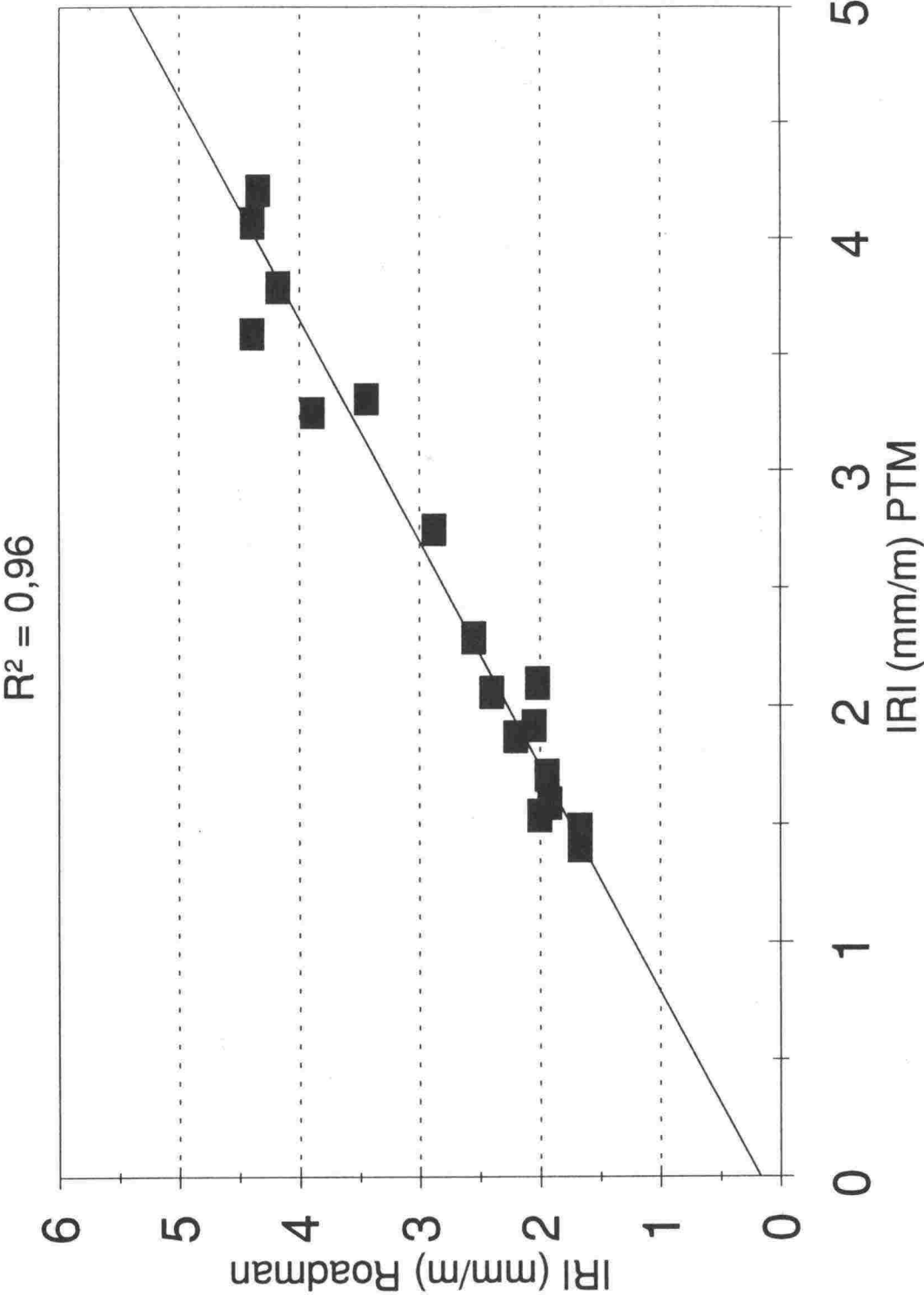
-
- 4.3 Takavetoisen auton pystykiehtyvyyksien maksimiavot taka-akselin oikealta ja vasemmalta pyörältä, akselin keskeltä ja taka-akselin päältä keskeltä koria, tie 53/1.
- 4.4 Takavetoisen auton pystykiehtyvyyksien maksimiavot taka-akselin oikealta ja vasemmalta pyörältä, akselin keskeltä ja taka-akselin päältä keskeltä koria, tie 143.
- 4.5 Etuvetoisen auton pystykiehtyvyyksien maksimiavot taka-akselin oikealta ja vasemmalta pyörältä, akselin keskeltä ja taka-akselin päältä keskeltä koria, tie 143.
- 4.6 Takavetoisen auton pystykiehtyvyyksien maksimiavot taka-akselin oikealta ja vasemmalta pyörältä, akselin keskeltä ja taka-akselin päältä keskeltä koria, tie 170.
- 4.7 Takavetoisen auton pystykiehtyvyyksien maksimiavot taka-akselin oikealta ja vasemmalta pyörältä, akselin keskeltä ja taka-akselin päältä keskeltä koria, tie 1271.
- 4.8 Takavetoisen auton pystykiehtyvyyksien maksimiavot taka-akselin oikealta ja vasemmalta pyörältä, akselin keskeltä ja taka-akselin päältä keskeltä koria ohjelmallisen suodatuksen jälkeen, tie 53/2.
- 4.9 Etuvetoisen auton pystykiehtyvyyksien maksimiavot taka-akselin oikealta ja vasemmalta pyörältä, akselin keskeltä ja taka-akselin päältä keskeltä koria ohjelmallisen suodatuksen jälkeen, tie 53/2.
- 4.10 Takavetoisen auton pystykiehtyvyyksien maksimiavot taka-akselin oikealta ja vasemmalta pyörältä, akselin keskeltä ja taka-akselin päältä keskeltä koria ohjelmallisen suodatuksen jälkeen, tie 143.
- 4.11 Etuvetoisen auton pystykiehtyvyyksien maksimiavot taka-akselin oikealta ja vasemmalta pyörältä, akselin keskeltä ja taka-akselin päältä keskeltä koria ohjelmallisen suodatuksen jälkeen, tie 143.

Regressiot PTM:n, IRI-auton ja Roadmanin välillä peruskoeosuuksilla.

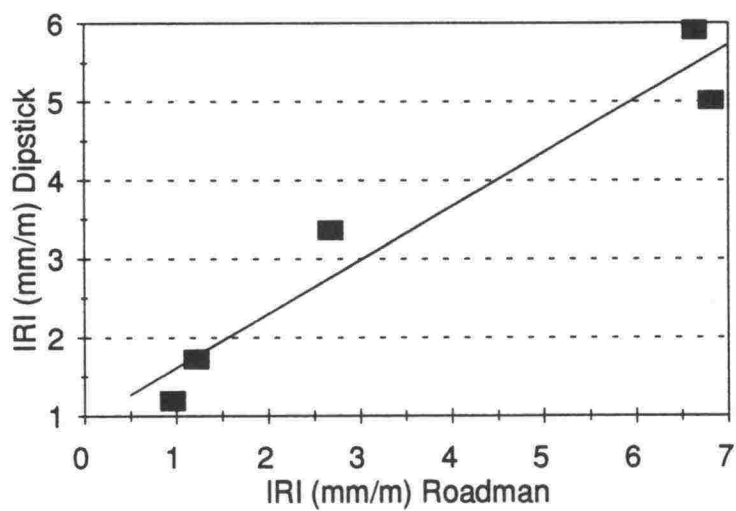
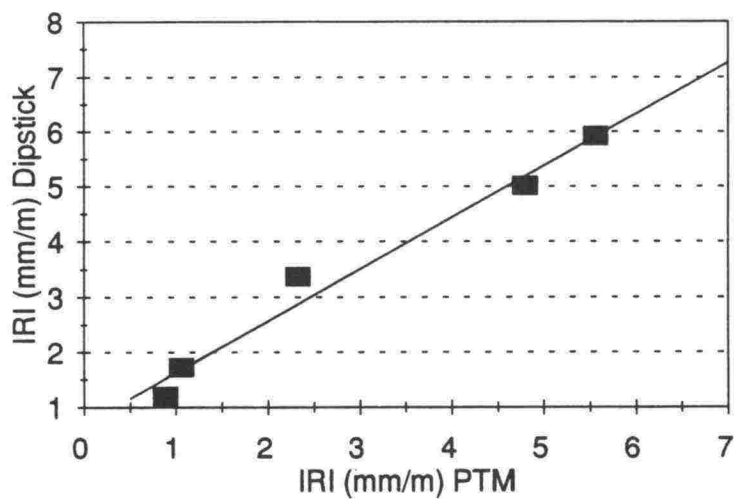
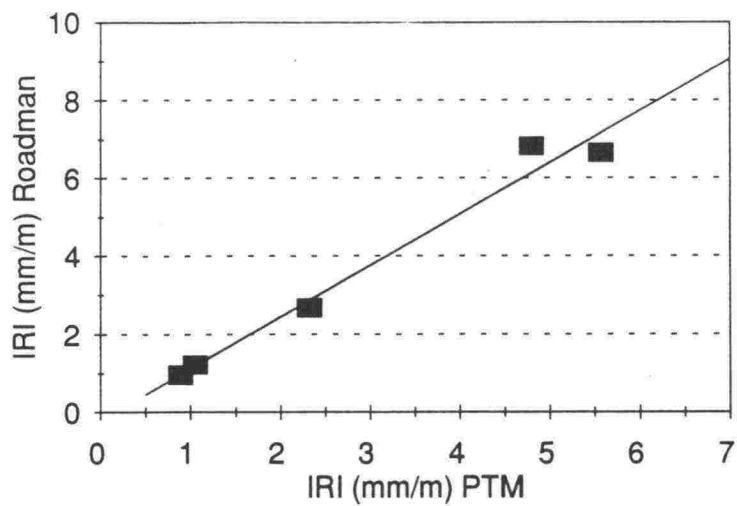


Regressio PTM:n ja Roadmanin välillä peruskoeosuuksilla.

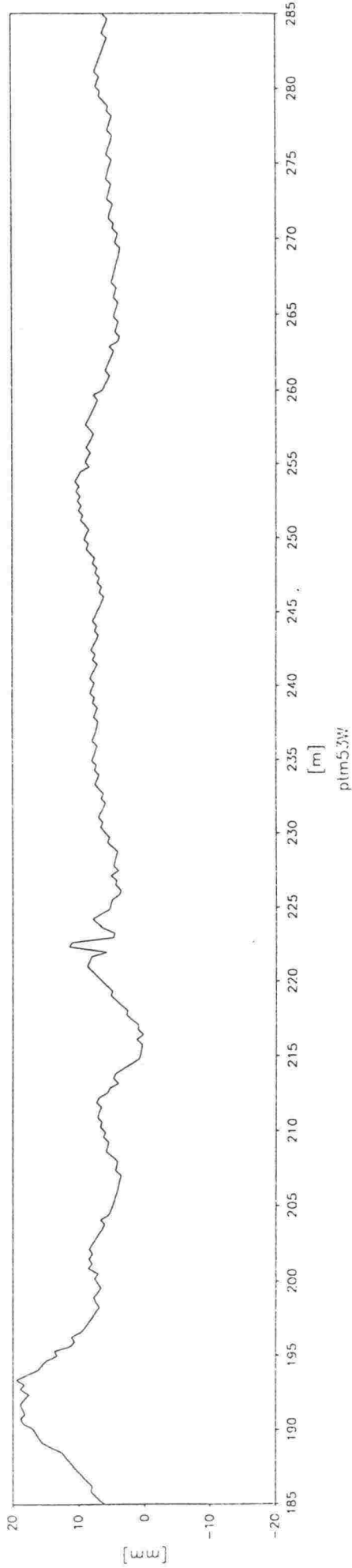
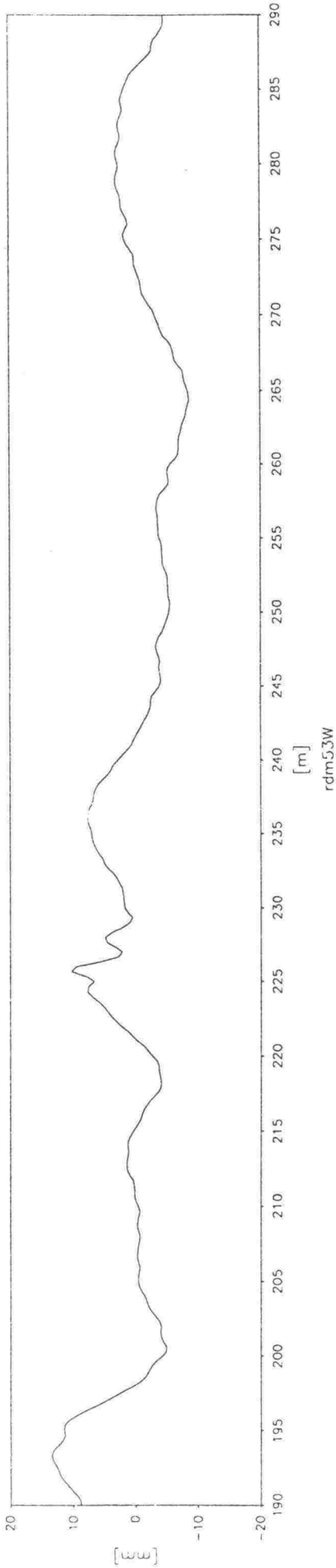
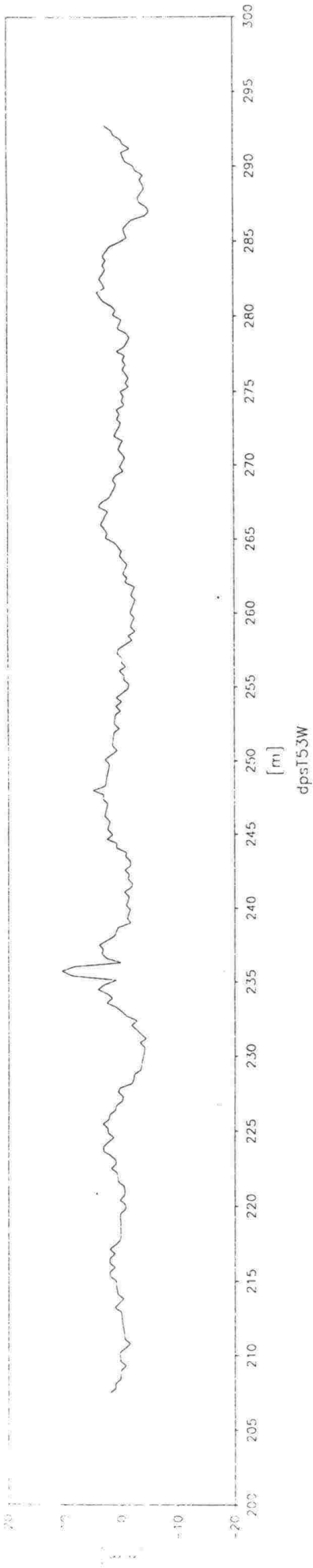
Regressio PTM-auton ja Roadman-laitteen välillä peruskoeosuuksilla

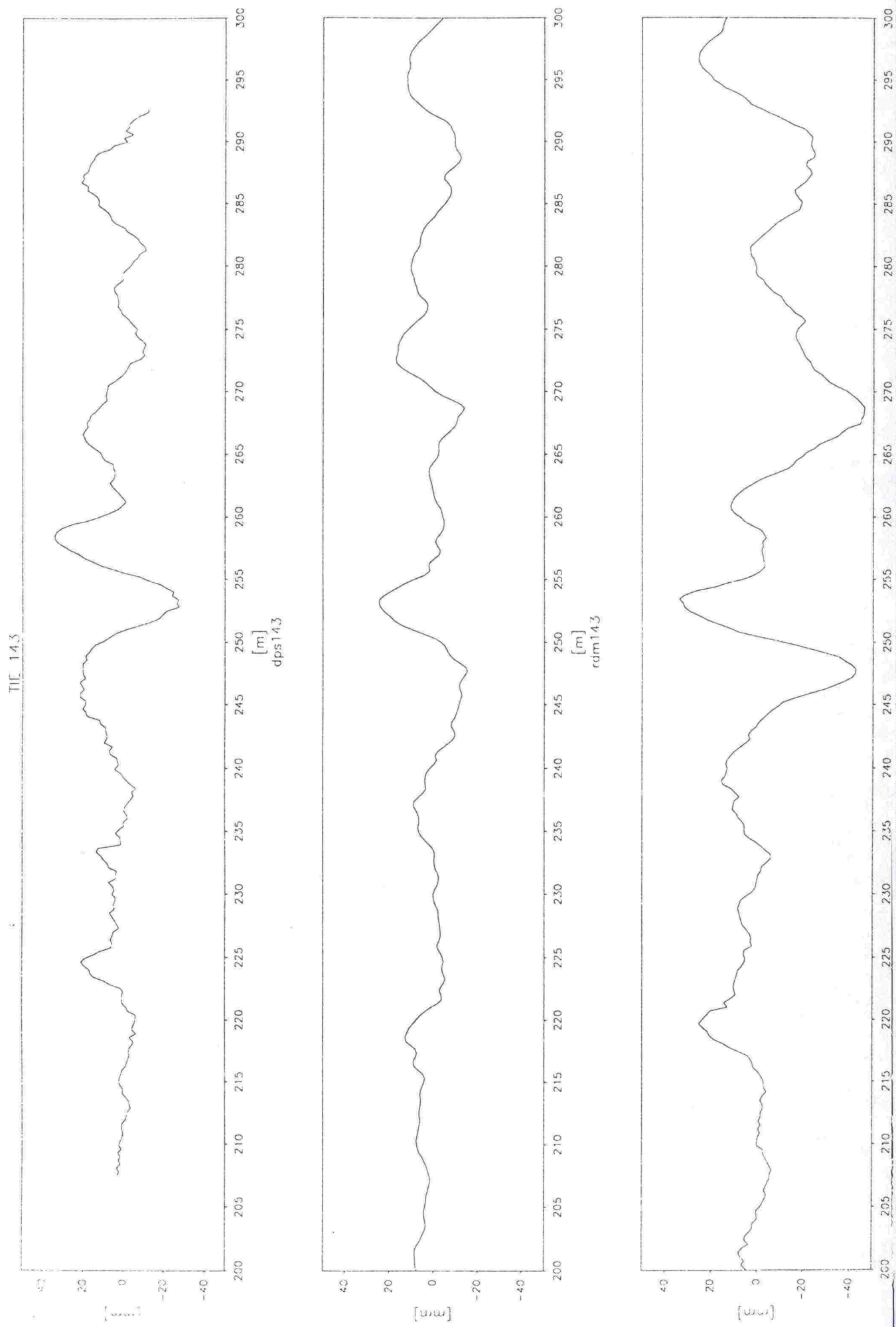


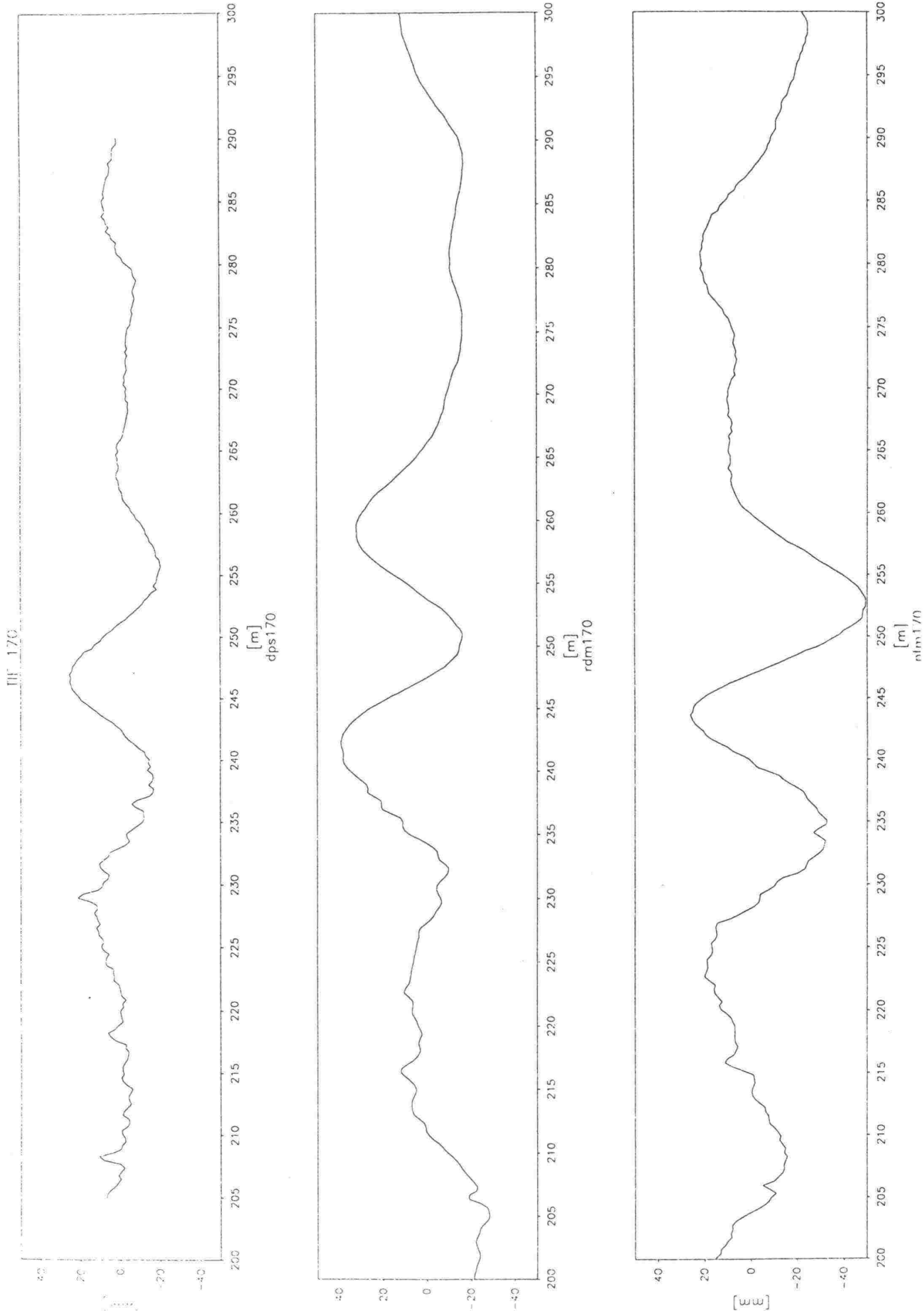
Regressiot PTM:n, Roadmanin ja Dipstickin välillä 100 metrin koeosuuksilla.



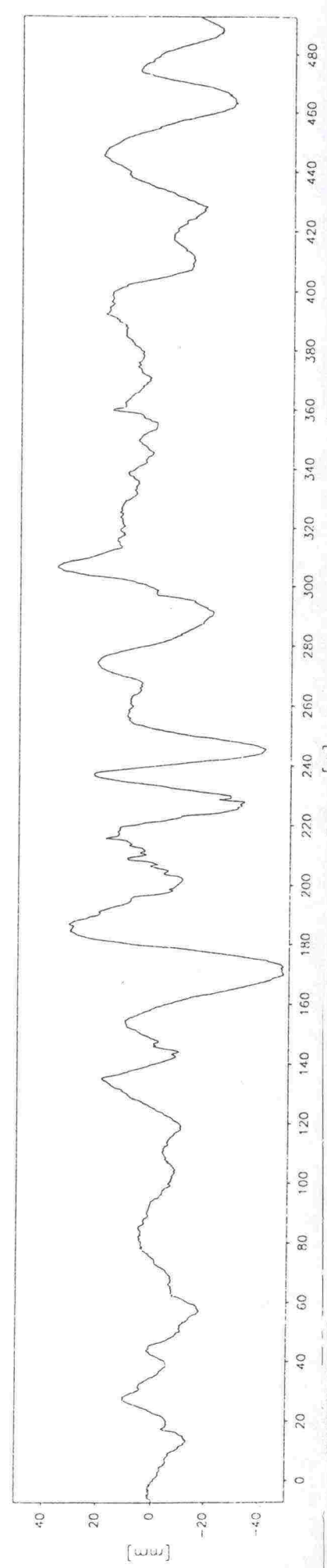
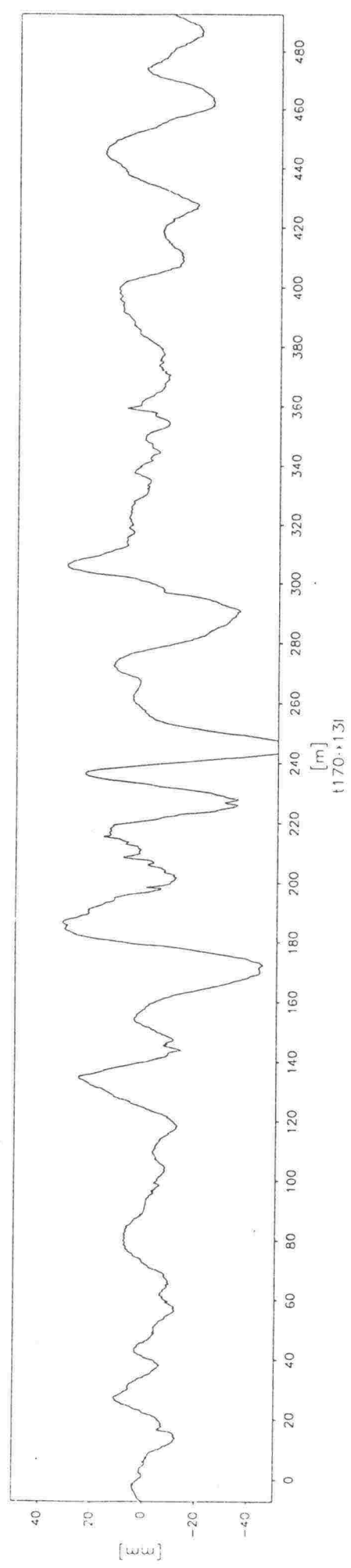
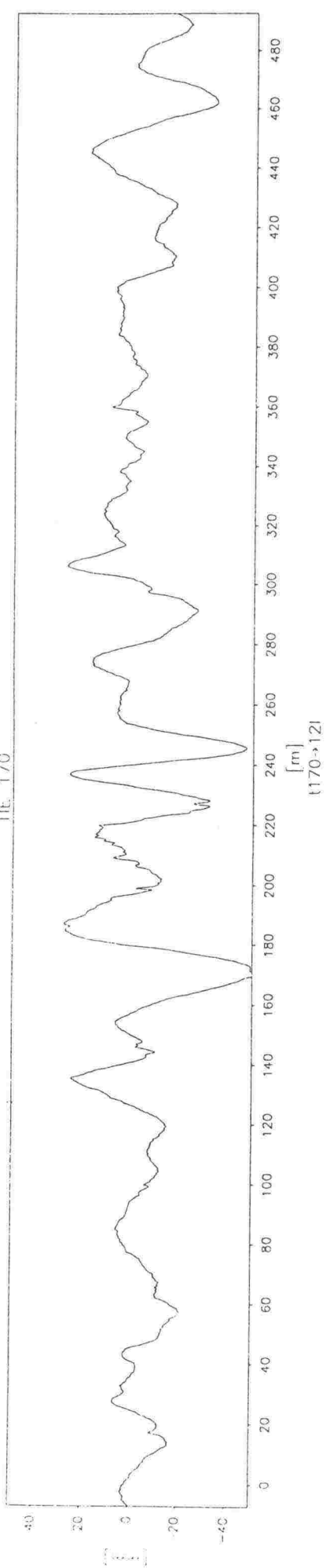
THE 53wim

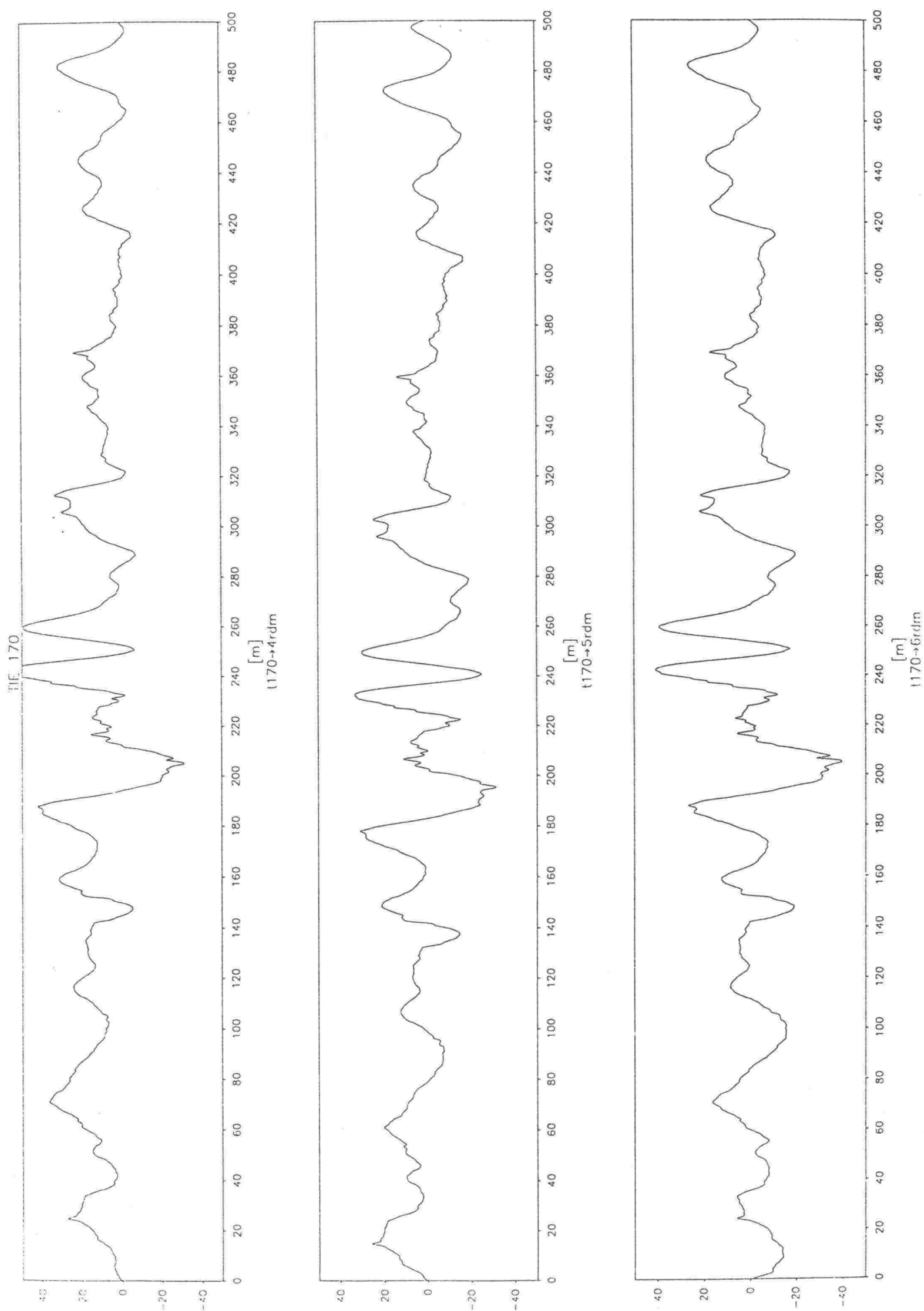






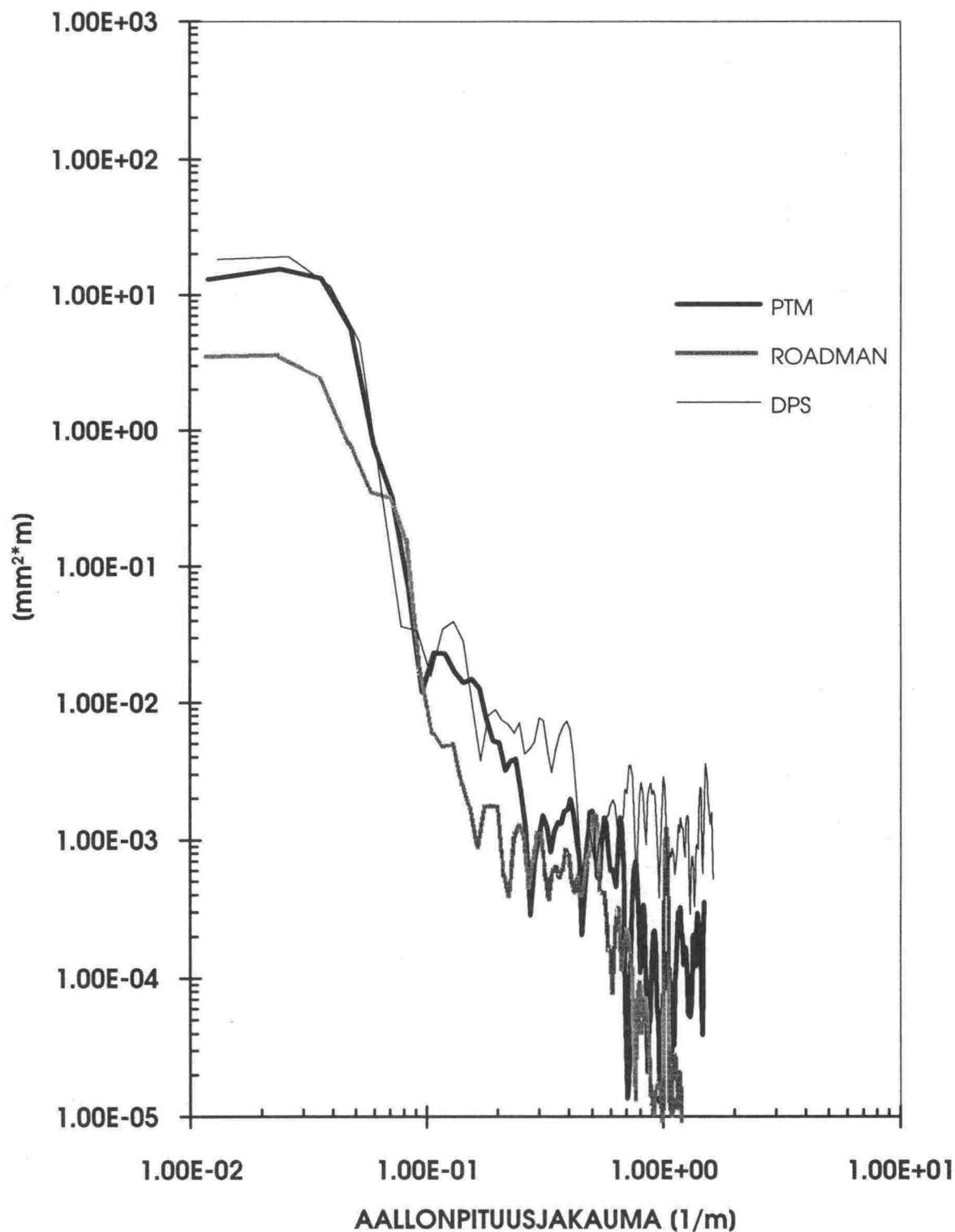
11E 170





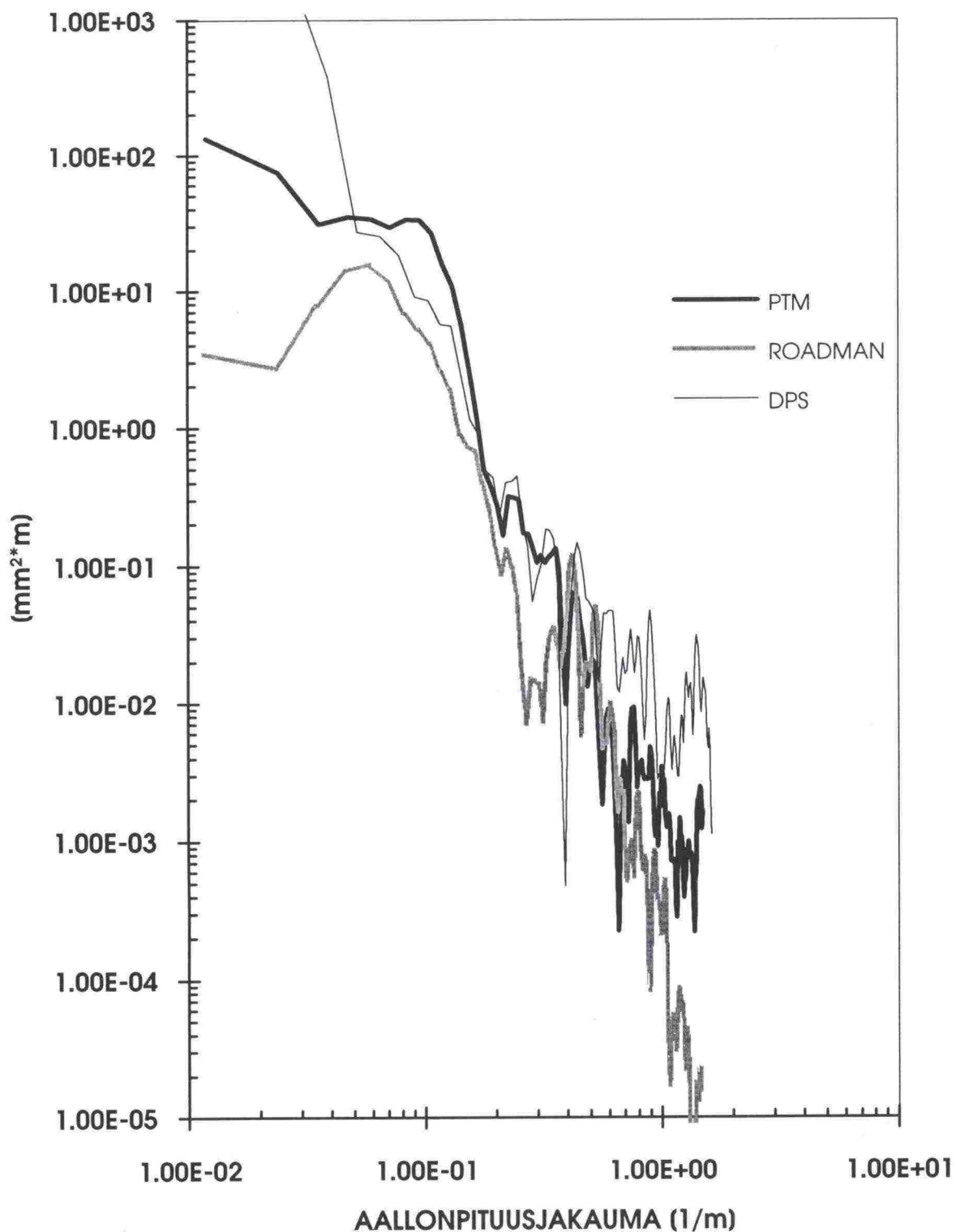
Epätasaisuuden taajuusjakautumat PTM:llä, Roadmanilla ja Dipstickillä koekoh-
teella 53/2.

KOEOSUUS 53/2



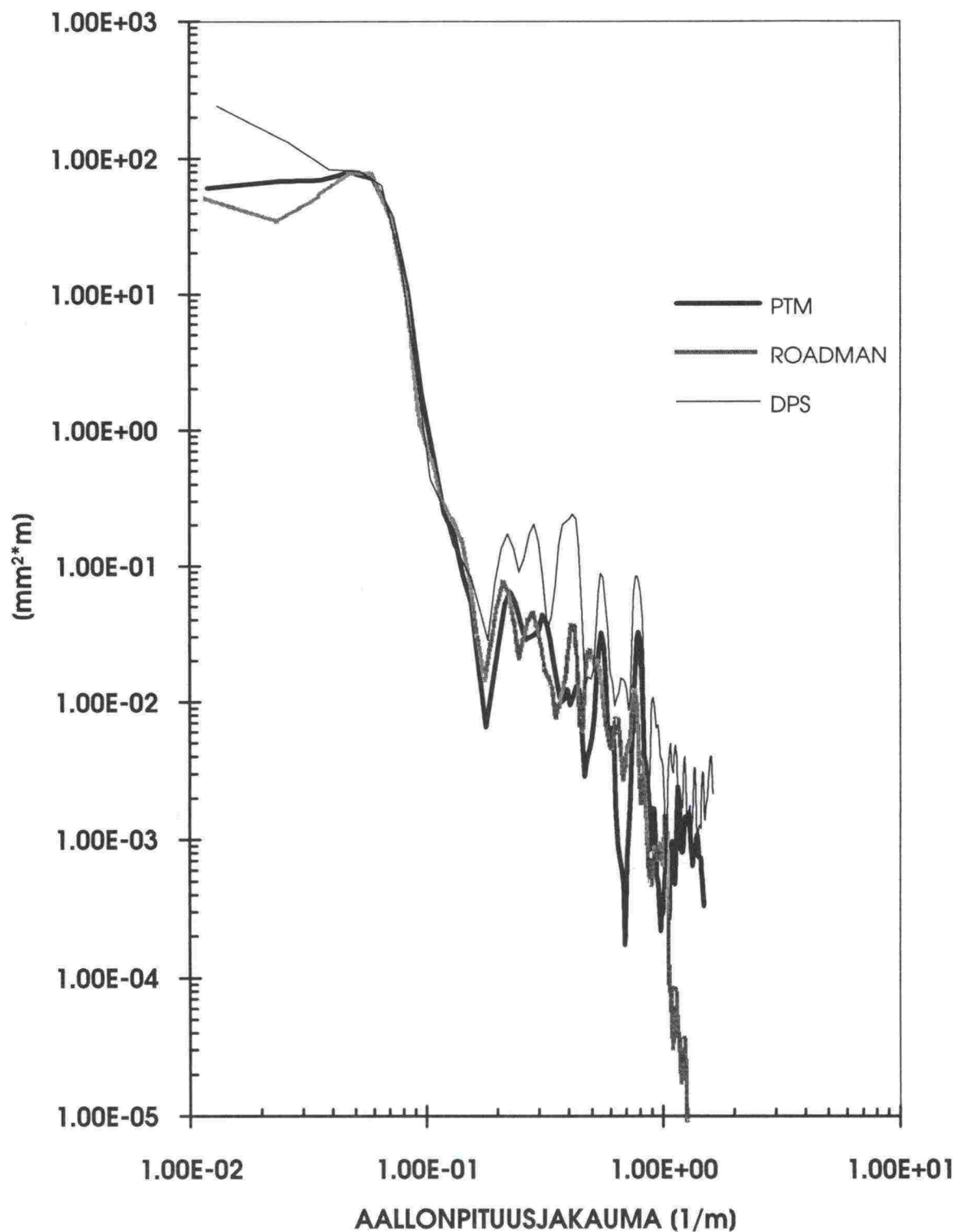
Epätasaisuuden taajuusjakautumat PTM:llä, Roadmanilla ja Dipstickillä koekoh-
teella 143.

KOEOSUUS 143

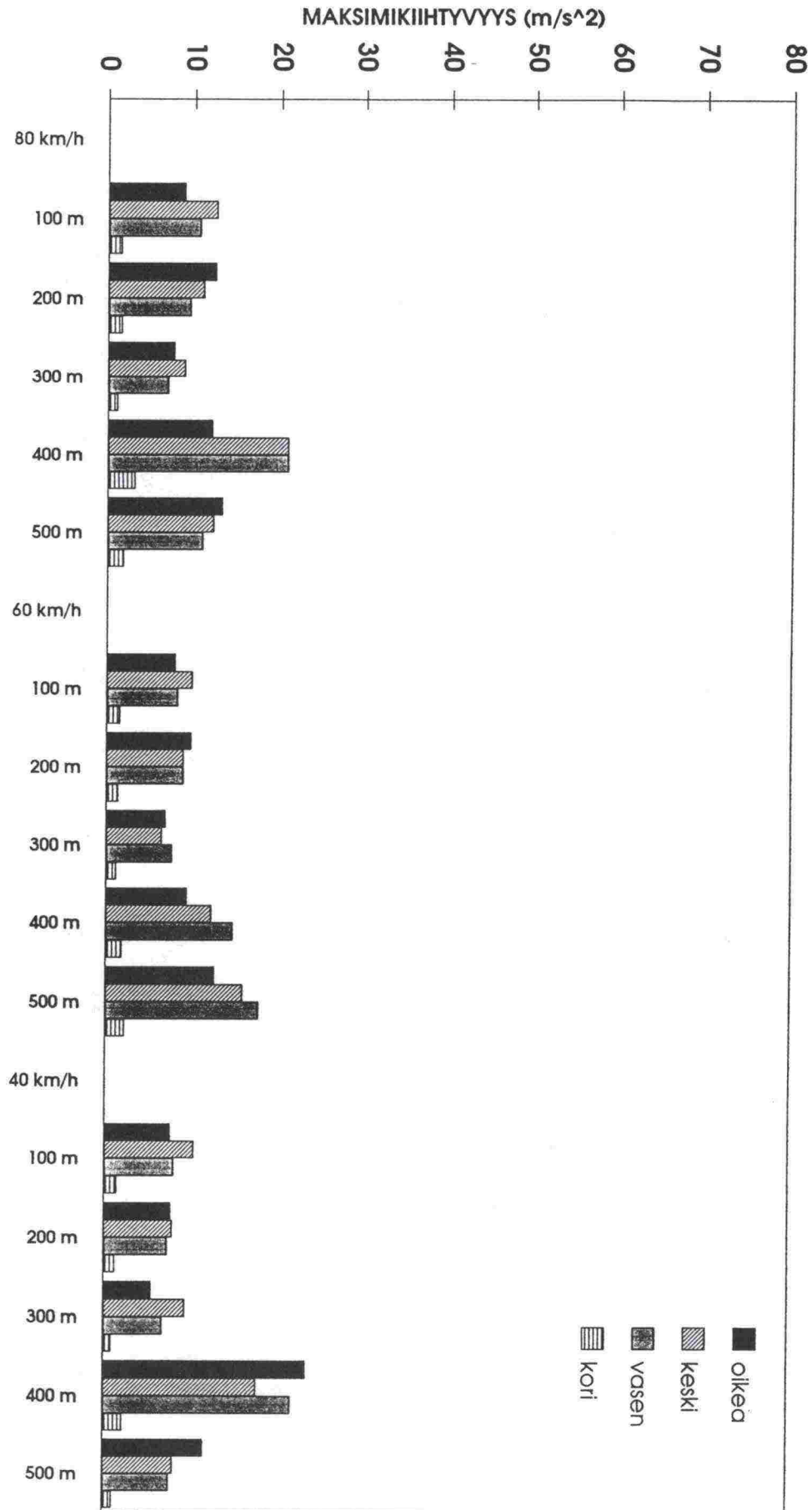


Epätasaisuuden taajuusjakautumat PTM:llä, Roadmanilla ja Dipstickillä koekoh-
teella 170.

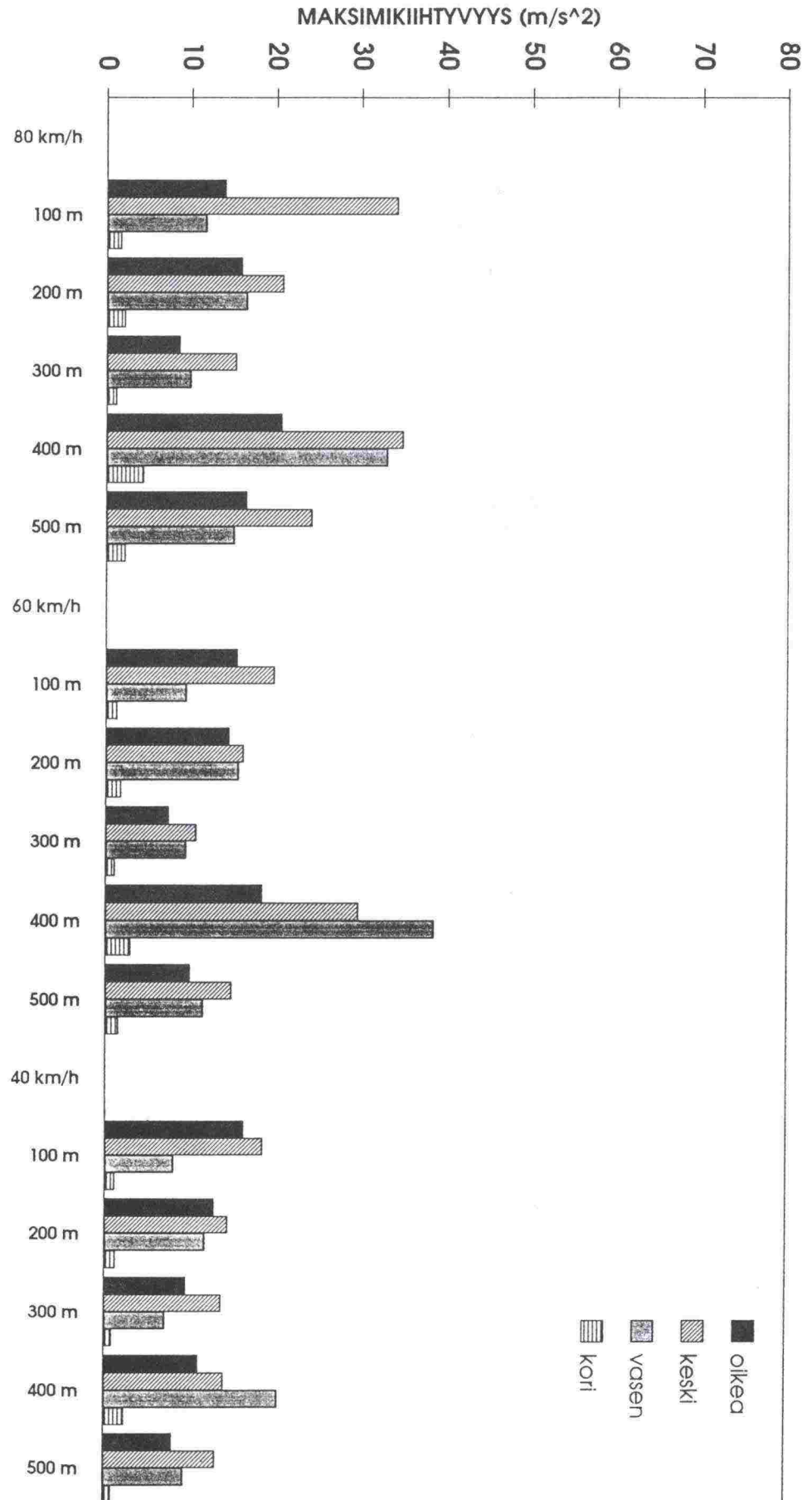
KOEOSUUS 170



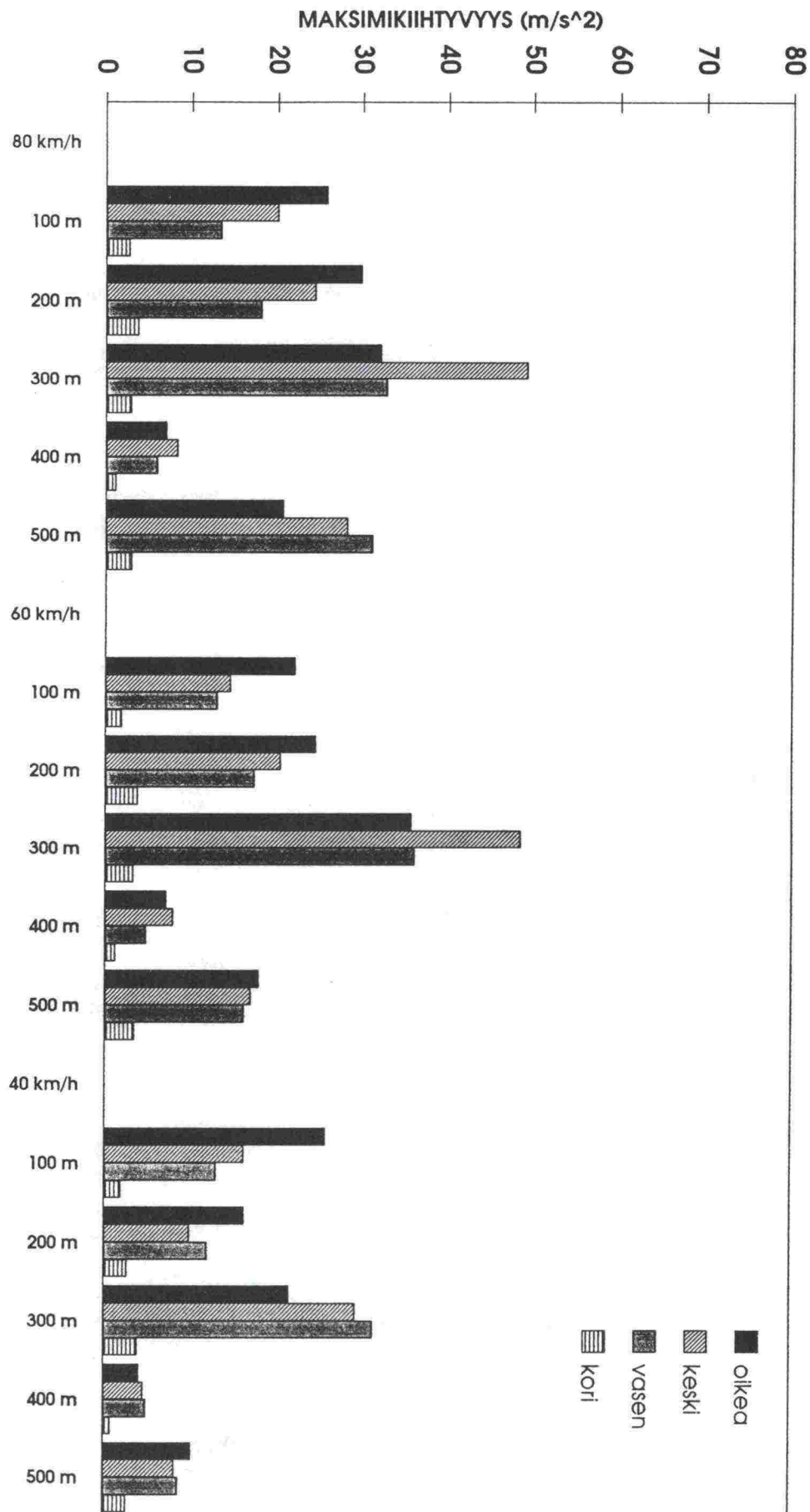
Takavetoisen auton pystykiihtyvyyksien maksimiavot taka-akselin oikealta ja vasemmalta pyörältä, akselin keskeltä ja taka-akselin päältä keskeltä koria, tie 53/2.



Etuvetoisen auton pystykiihtyvyyksien maksimi-arvot taka-akselin oikealta ja vasemmalta pyörältä, akselin keskeltä ja taka-akselin päältä keskeltä koria, tie 53/2.

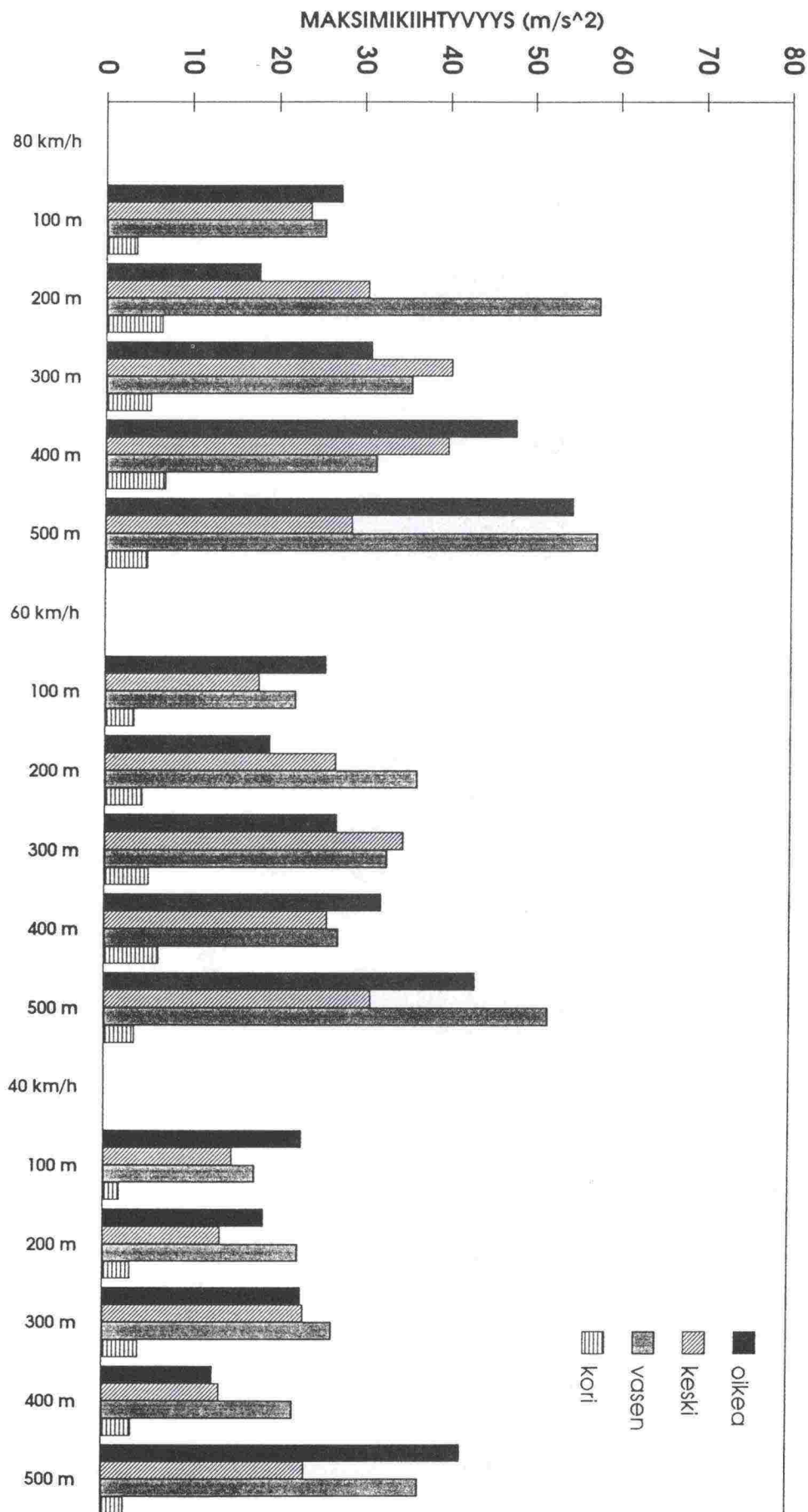


Takavetoisen auton pystykiihtyvyyksien maksimiarvot taka-akselin oikealta ja vasemmalta pyörältä, akselin keskeltä ja taka-akselin päältä keskeltä koria, tie 53/1.

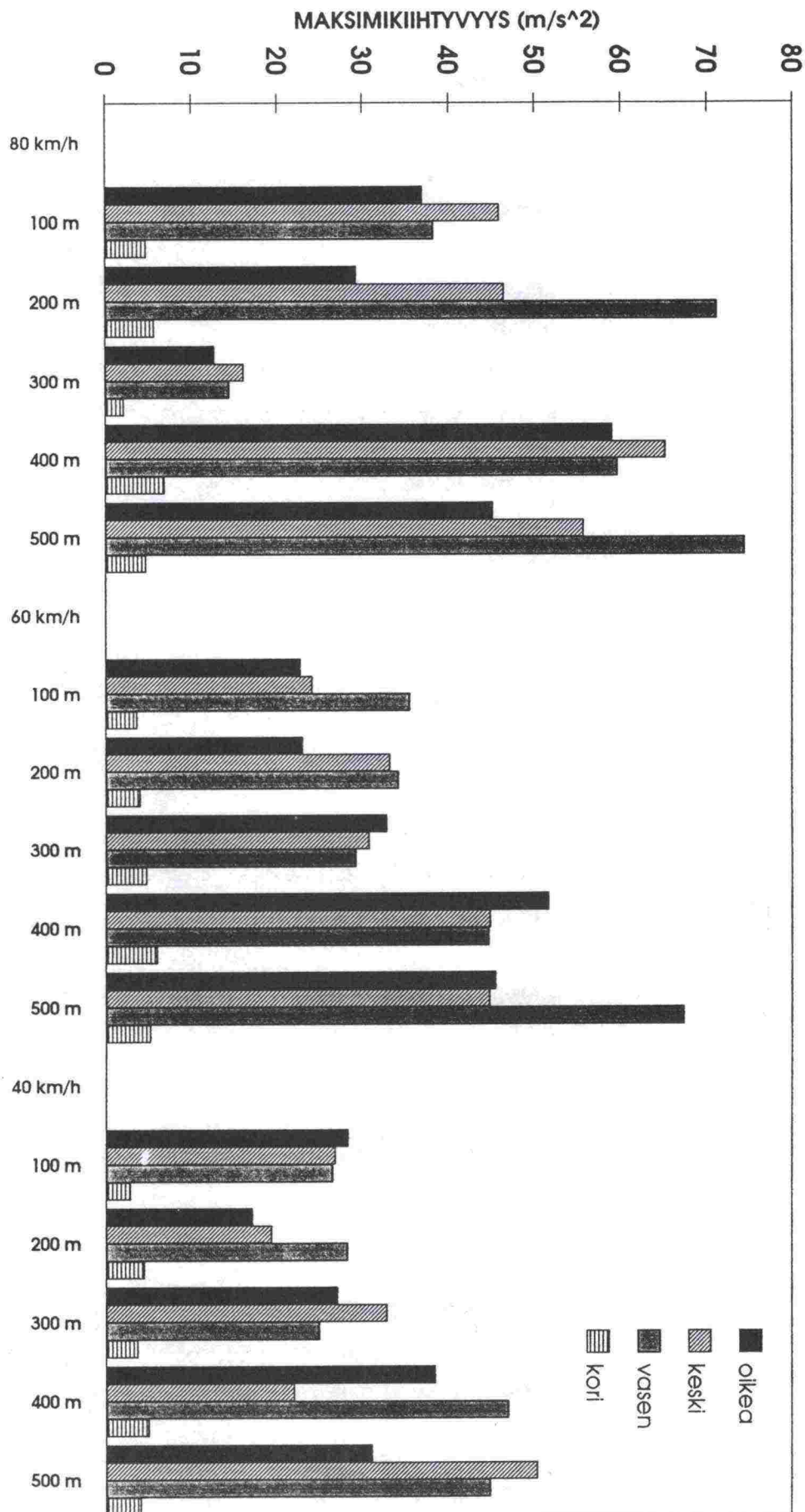


tie53wlm

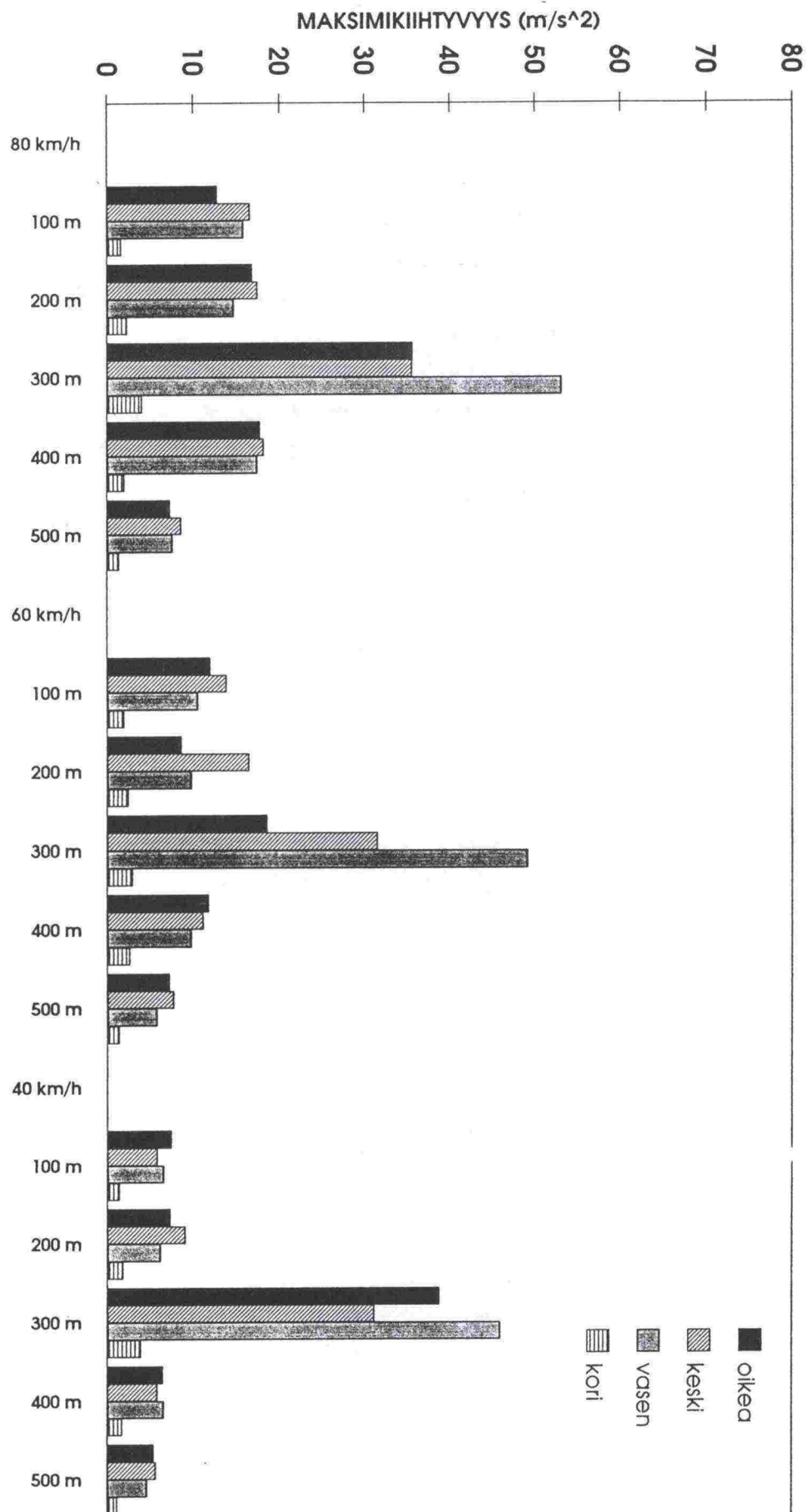
Takavetoisen auton pystykiihtyvyyksien maksimiavot taka-akselin oikealta ja vasemmalta pyörältä, akselin keskeltä ja taka-akselin päältä keskeltä koria, tie 143.



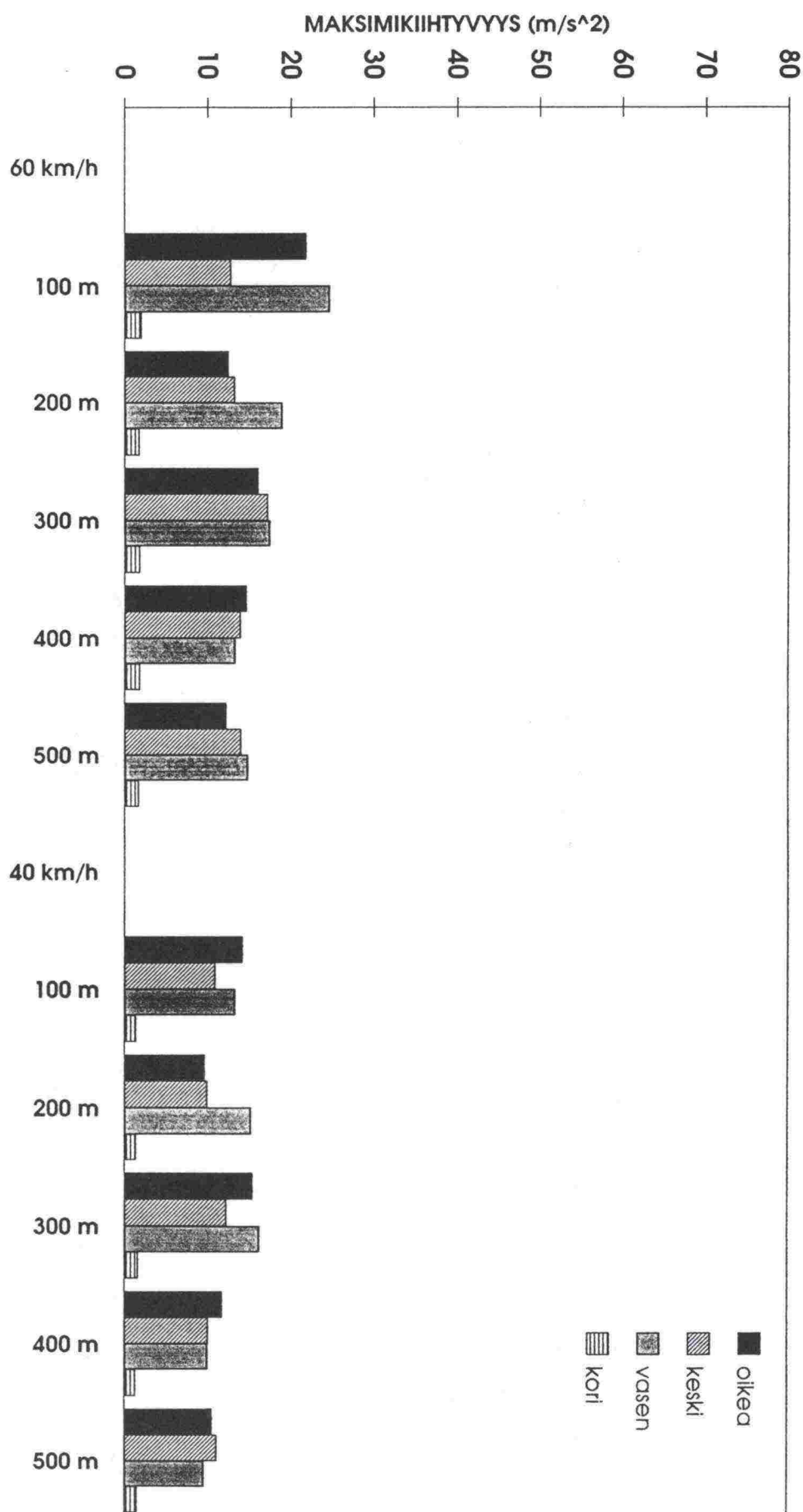
Etuvetoisen auton pystykiihtyvyyksien maksimiavot taka-akselin oikealta ja vasemmalta pyörältä, akselin keskeltä ja taka-akselin päältä keskeltä koria, tie 143.



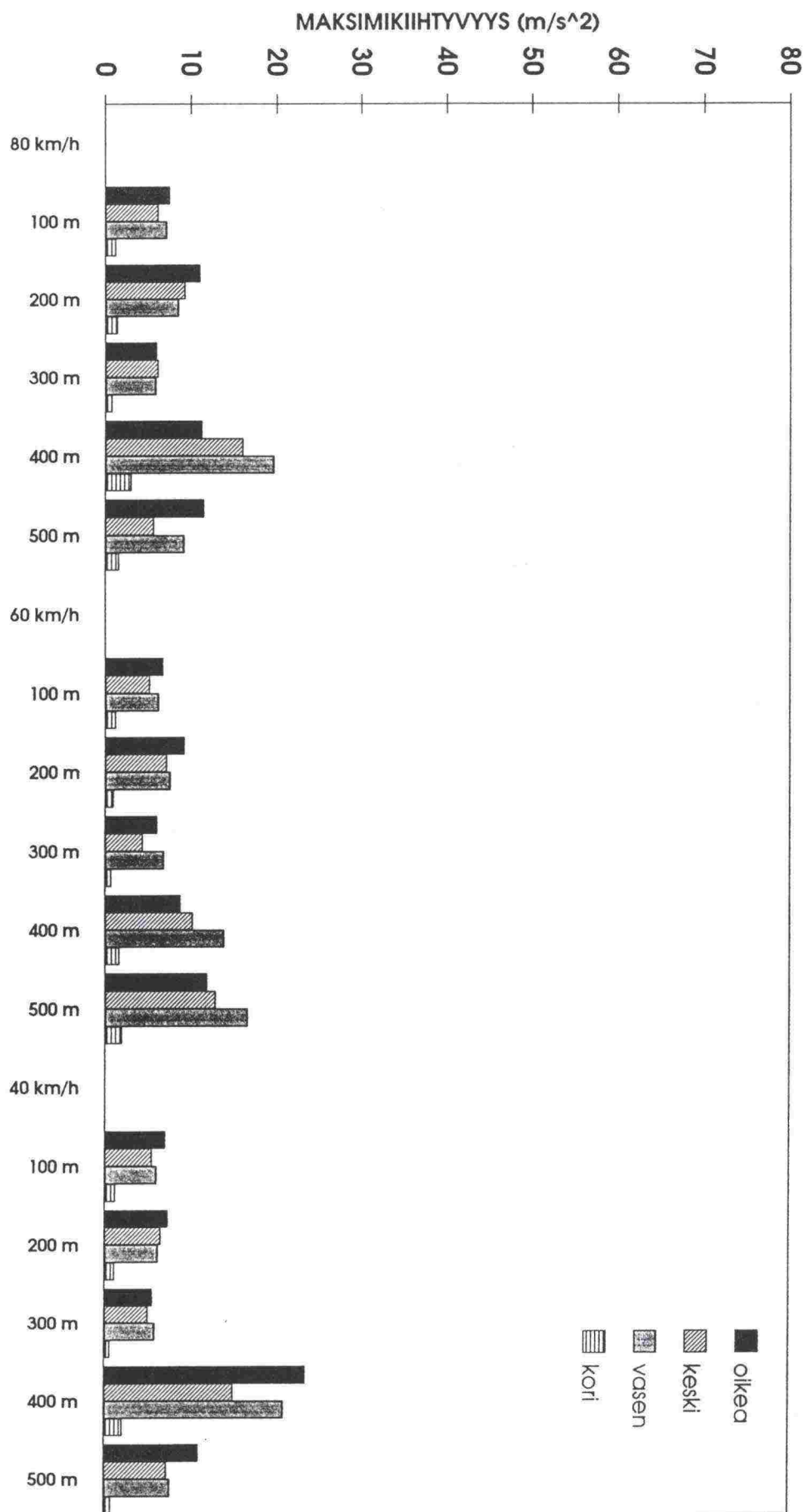
Takavetoisen auton pystykiihtyvyyksien maksimi-arvot taka-akselin oikealta ja vasemmalta pyörältä, akselin keskeltä ja taka-akselin päältä keskeltä koria, tie 170.



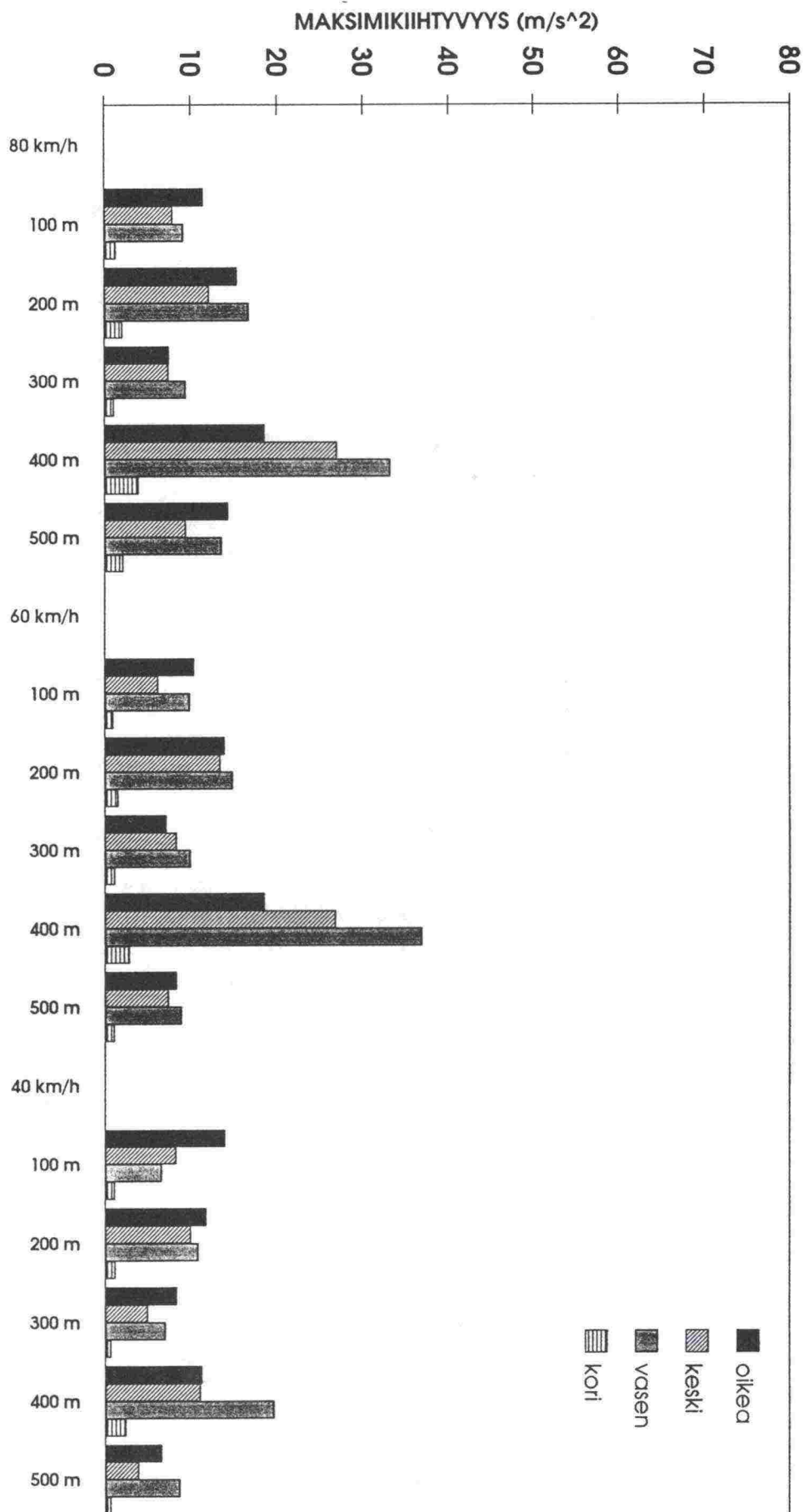
Takavetoisen auton pystykihtiävyyksien maksimiavot taka-akselin oikealta ja vasemmalta pyörältä, akselin keskeltä ja taka-akselin päältä keskeltä koria, tie 1271.



Takavetoisen auton pystykiihtyvyyksien maksimiavot taka-akselin oikealta ja vasemmalta pyörältä, akselin keskeltä ja taka-akselin päältä keskeltä koria ohjelmallisen suodatuksen jälkeen, tie 53/2.

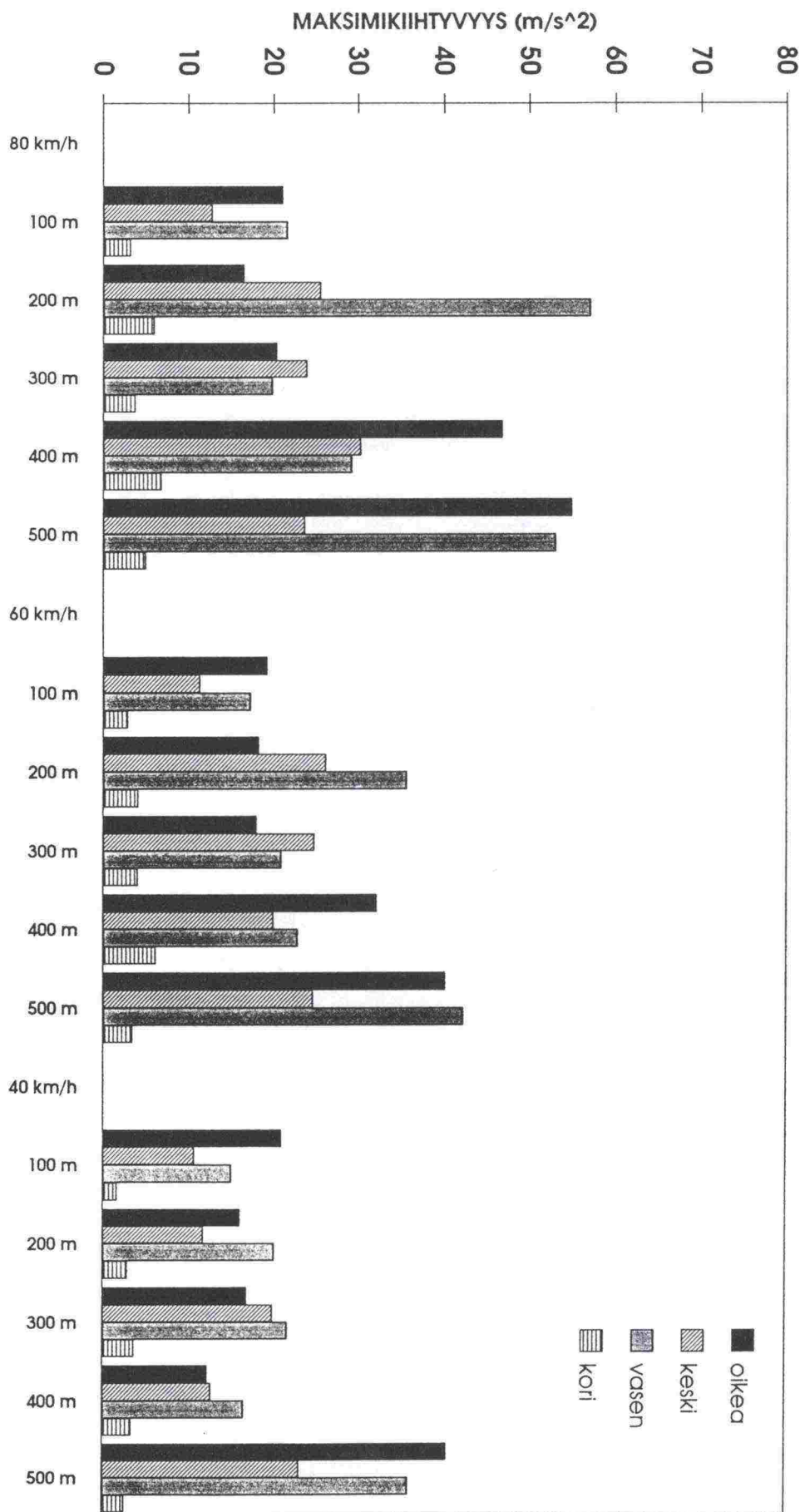


Etuvetoisen auton pystykiihtyvyyksien maksimi-arvot taka-akselin oikealta ja vasemmalta pyörältä, akselin keskeltä ja taka-akselin päältä keskeltä koria ohjelmallisen suodatuksen jälkeen, tie 53/2.

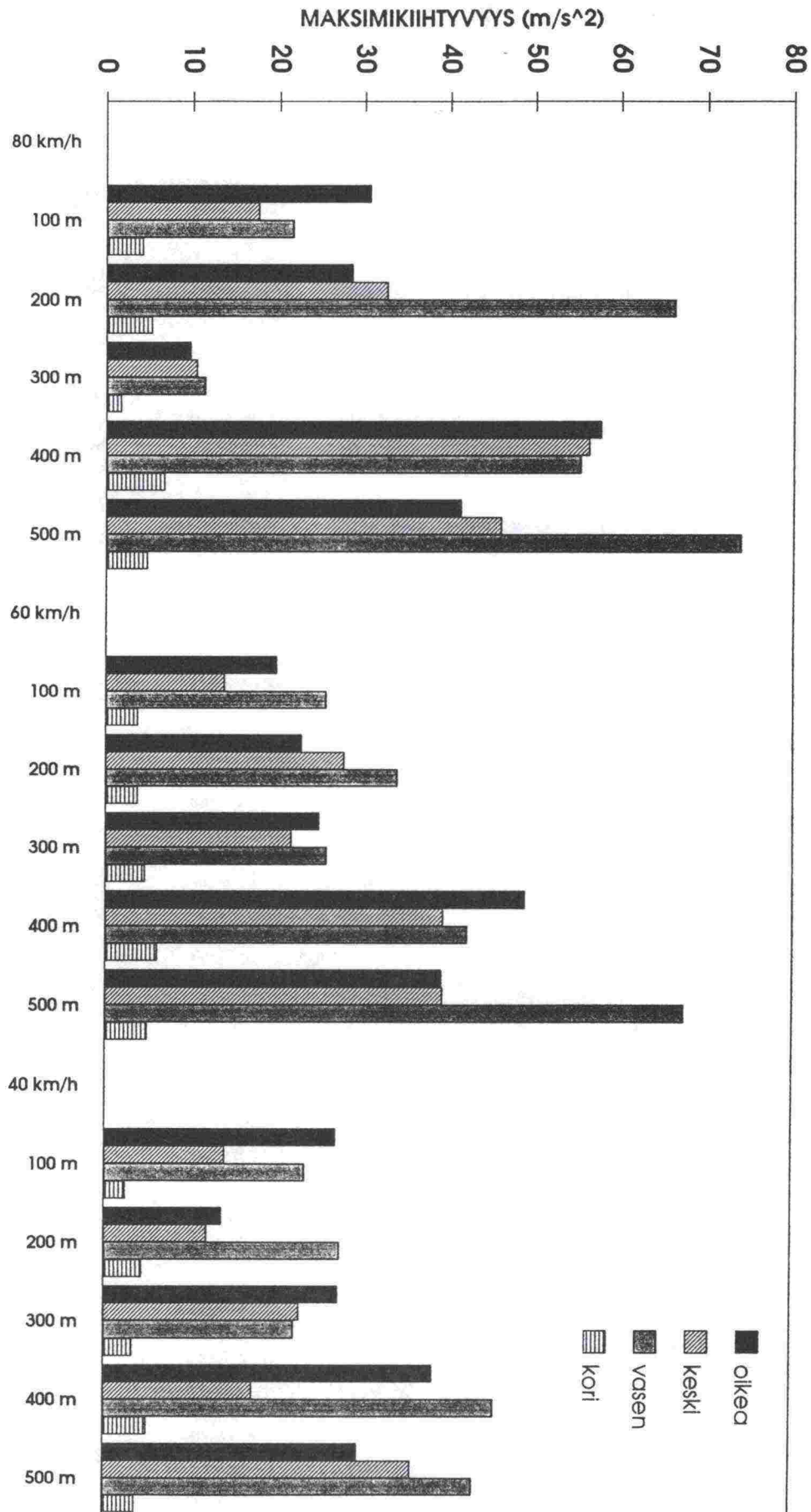


tie53e suodatus

Takavetoisen auton pystykiihtyvyyksien maksimiavot taka-akselin oikealta ja vasemmalta pyörältä, akselin keskeltä ja taka-akselin päältä keskeltä koria ohjelmallisen suodatuksen jälkeen, tie 143.



Etuvetoisen auton pystykiihtyvyyksien maksimi-arvot taka-akselin oikealta ja vasemmalta pyörältä, akselin keskeltä ja taka-akselin päältä keskeltä koria ohjelmallisen suodatuksen jälkeen, tie 143.



tie 143e suodatus

TIEHALLITUKSEN SISÄISIÄ JULKAISUJA

- 1/1991 Kerrosten laatuvirheiden esto. Tampereen tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 5/1991 Massanvaihdon korvaaminen moreenitukiseinällä. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 6/1991 Havupuuhaake pengertäytteenä. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 13/1991 Tieverkkojen asentaminen, käytännön ohjeita. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 15/1991 Vairioinventoinnin tulosten käsittelyohjelmistot, lomake, mittari ja siirto. Tampereen tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 16/1991 Asfalttimassan suhteitus Marshal-menetelmän mukaan. Geopalvelukeskus
- 17/1991 Murskeen muodonmuutosominaisuudet tien rakennekerroksissa. Geopalvelukeskus
- 20/1991 Routavaurio- ja kuivatustutkimus; Kalliokohdetutkimus. TIEL 4000003
- 21/1991 Routavaurio- ja kuivatustutkimus; Pituushalkeamat osa I, Routanousun vaikutus halkeamatodennäköisyyteen. TIEL 4000004
- 22/1991 Routavaurio- ja kuivatustutkimus; Pituushalkeamat osa II, Tien rakenne- ja olosuhdetekijöiden vaikutus tien routanousuihin. TIEL 4000005
- 23/1991 Betonipäällysteen seuranta; Raportti suunnittelusta ja rakentamisesta. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 25/1991 Tiivistyskurssi; Maarakenteiden tiivistäminen. Tampereen tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 26/1991 Omajohtoisissa töissä käytetyn tiivistyskaluston nykytilaselvitys vuosilta 1987-90. Tampereen tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 27/1991 Sorateiden kelirikkovaurioiden korjaaminen, väliraportti I. Kuopion tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 32/1991 Moreenin käyttö tierakenteissa. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 20/1992 Vanhojen tienrakennekerrosten uudelleen käyttö. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 26/1992 Kalliomurskeiden käyttö sitomattomissa rakennekerroksissa, esiselvitys. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 32/1992 Sorateiden kelirikkovaurioiden korjaaminen, väliraportti II; Prosessikipsin ja biotiitin materiaalitutkimukset. Kuopion tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 34/1992 Routavaurio- ja kuivatustutkimus; Pituushalkeamat osa III, Elävät pituushalkeamat ja niiden syntymistodennäköisyys routivassa tierakenteessa. TIEL 4000017
- 35/1992 Routavaurio- ja kuivatustutkimus; Kuivatustutkimus osa I sekä roudan syvyys-havainnot. TIEL 4000018
- 42/1992 Pehmeikölle perustettavan tiepenkereen geotekniset laskelmat. Geopalvelukeskus
- 43/1992 Pehmeikölle rakennettavien tieleikkausten geotekniset laskelmat. Geopalvelukeskus
- 44/1992 Saven varaan perustetut alikulkukäytävät. Geopalvelukeskus
- 45/1992 Tielaitoksen pudotuspainolaitteiden vertailu; Saarijärvi 8 - 9.7.1992. TIEL 4000023

TIELAITOKSEN SISÄISIÄ JULKAISUJA

- 10/1993 Päällistetyin tieverkon kuntomittaukset ja hallintajärjestelmät. Tuotannon palvelukeskus

TIELAITOKSEN TUTKIMUKSIA

- 3/1992 Viipurin batoliitin eri rapakivityyppien soveltuvuus tienpäälyste-
kiviaineksi. TIEL 3100004
- 4/1992 Tiepenkereen holvautuminen, loppuraportti. TIEL 3100005

TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 25/1991 Tiepenkereen kantavuusvaihtelu ja laskennalliset kantavuudet.
TIEL 3200024
- 1/1992 Pystyjanauhojen laatuvaatimukset; laadunvalvonta ja testaus-
menetelmät. TIEL 3200057
- 31/1992 Pohjaveden maatiivistesuojan tiivistäminen. TIEL 3200086
- 46/1992 Syvästabiloinnin laadunvalvontaohje. TIEL 3200099
- 62/1992 Hienoaineksen vaikutus stabiloidun moreenimurskeen pakkas-
kestävyyteen. TIEL 3200112
- 68/1992 Tien pohja- ja päällysrakenteet -tutkimusohjelma (TPPT),
perussuunnitelma. TIEL 3200118
- 69/1992 Rakennettujen ja perusparannettujen teiden tasaisuus.
TIEL 3200119
- 1/1993 Arktinen tienrakentaminen. TIEL 3200121
- 8/1993 Sitomattoman kantavan kerroksen rakentaminen. TIEL 3200135
- 15/1993 Masuunikuonan käyttö sitomattomissa päällysrakennekerroksissa.
TIEL 3200142
- 19/1993 Teiden kuntoa ja palvelutasoa koskeva seurantatutkimus. TIEL 3200145
- 20/1993 Moreeni ja sen käyttö. TIEL 3200146
- 26/1993 Bentoniittimattojen ja muovikavojen kelpoisuus pohjaveden suojaukseen,
tutkimuksia ja suosituksia. TIEL 3200152
- 35/1993 Strategic Highway Research Program (SHRP) - Long-Term Pavement
Performance (LTPP); Koeteillä tehdyt mittaukset vuonna 1992 ja tieraken-
teen vaurioitumiseen vaikuttavat tekijät. TIEL 3200160
- 38/1993 Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet;
Kirjallisuusselvitys. TIEL 3200163
- 39/1993 Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet;
Esiselvitysvaiheen kuormituskokeet. TIEL 3200164
- Geotekniikan informaatiojulkaisuja:
- 2/1993 Massanvaihto. TIEL 3200127
- 21/1993 Pengerpaalutus. TIEL 3200147
- 23/1993 Pohjanvahvistusmenetelmän valinta. TIEL 3200149
- 24/1993 Tiegeotekniikan yleiset suunnitteluperusteet. TIEL 3200150